

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2016

Václav Balwar

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

**Akumulace energie získané
z obnovitelných zdrojů**

Systems for accumulation of energy gained from
renewable resources

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání bakalářské práce

Student: **Václav Balwar**
Studijní program: B2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907R001 Elektroenergetika
Téma: **Systémy pro akumulaci energie získané z obnovitelných zdrojů**
Systems for accumulation of energy gained from renewable resources

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Zdroje na bázi OZE s nestabilní dodávkou elektrické energie
2. Akumulace jako prostředek k vyrovnání fluktuací výkonu těchto zdrojů
3. Variantní návrh systému akumulace pro vybraný obnovitelný zdroj
4. Porovnání navržených variant dle technických a ekonomických kritérií

Seznam doporučené odborné literatury:

1. Cenek, M.: Akumulátory od principu k praxi, FCC Public.
2. Barin, A. and col.: Multiple Criteria Analysis for Energy Storage Selection, Journal of Energy and Power Engineering, 2011.
3. Bartoš, V.: Obnovitelné zdroje energií, Grada Publishing, Praha, 2010.
4. Bilíček, P.: Problematika větrných a fotovoltaických zdrojů v distribučních sítích, Diplomová práce, Ostrava, 2011.
5. Libra, M., Poulek, V.: Fotovoltaika – Teorie i praxe využití solární energie, Vydavatelství ILSA, 2009.
6. Murtinger, K., Beranovský, J., Tomeš, M.: Fotovoltaika - elektřina ze slunce, Vydavatelství ERA, 2007.
7. Nieslanik, T.: Analýza kvality napětí z obnovitelných zdrojů, Bakalářská práce, Ostrava, 2010.
8. Malyrz, L.: Současné možnosti akumulace energie, Bakalářská práce, Ostrava, 2012.
9. <http://energie.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=4279&h=206&pl=49>
10. <http://oze.tzb-info.cz/7435-akumulace-elektriny>
11. <http://www.4-construction.com/cz/clanek/akumulace-elektricke-energie/>
12. <http://www.electricitystorage.org/site/technologies/>
13. <http://proatom.luksoft.cz/view.php?cisloclanku=2008050001>

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

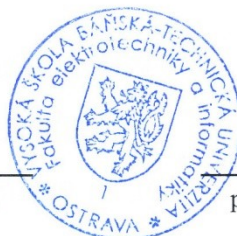
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Moldřík, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2015

Datum odevzdání: 29.04.2016



prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

„Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

V Ostravě dne 27. 4. 2016



.....
Václav Balwar

Poděkování:

Tímto chci poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Petrovi Moldříkovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky, které mi pomohly v tvorbě této práce.

Abstrakt:

Tato bakalářská práce je zaměřena na problematiku akumulace energie z alternativních zdrojů s nestabilní dodávkou energie a pokrytí fluktuací. Pomocí analýzy naměřených hodnot výroby energie fotovoltaické elektrárny a spotřeby objektu, jsem vyřešil kapacitu akumulčního prvku. Dále jsem navrhl tři varianty akumulčního systému, které jsem srovnal z hlediska technické a finanční stránky. Výsledné řešení poskytne možnou energetickou úsporu objektu, která bohužel finančně nevychází příliš ekonomicky. Na základě této práce je tedy možno zhodnotit návratnost systému, která rozhoduje o jeho budoucím použití.

Klíčová slova

Alternativní zdroje; Akumulační systémy; Fluktuace; Akumulátor; Ostrovní systém; Chemická akumulace; Návratnost akumulčního systému

Abstract:

This thesis is focused on the accumulation of energy from alternative sources with unstable power supply and coverage fluctuations. Using analysis of the measured values of power generation photovoltaic power and consumption of the building, I solved the capacity of the storage element. Further I suggested three variants of the storage system, which I compared in terms of technical and financial aspects. The resulting solutions provide the building possible savings the electrical energy taken from the grid, which unfortunately does not rise too economically. Based on this work is therefore possible gauge the return on system, which decides on its future use.

Key words:

Alternative sources; Storage systems; Fluctuation; Battery; Offgrid systems; Chemical storage; Return on storage system

Obsah:

Úvod:	1
1. Alternativní zdroje	2
1.1 Alternativní zdroje	2
1.2 Solární energie	2
1.3 Větrná energie	4
1.4 Geotermální energie	6
1.5 Vodní energie	6
2. Systémy akumulace energie z alternativních zdrojů pro ostrovní síť	8
2.1 Fluktuace, ostrovní síť	8
2.2 Elektrochemická akumulace	8
2.2.1 Olověné akumulátory	8
2.2.2 Ni-Cd akumulátor	9
2.2.3 Ni-Zn a Ag-Zn akumulátory	9
2.2.4 Ni-MH Akumulátory	9
2.2.5 Li-ion	10
2.2.6 NAS akumulátory	10
2.3 CAES (compressed air energy storage)	11
2.4 Superkapacitor	11
2.5 Akumulace v magnetickém poli cívky	12
2.6 Mechanické akumulátory	12
2.7 Přecherpací vodní elektrárny	12
2.8 Vodíkové hospodářství, palivové články	13
2.8.1 Elektrolýza a uskladnění	13
2.8.2 Palivové články	14
2.9 Vanadové redoxní baterie	16
2.10 Srovnání jednotlivých druhů akumulátorů	17
3. Variantní návrh systému akumulace pro fotovoltaický systém	19
3.1 Stávající Fotovoltaický systém	19
3.2 Spotřeba energie objektu	22
3.3 Akumulační systém	24
3.3.1 Denní spotřeba a přebytky	25
3.3.2 Akumulační kapacita	26
3.3.3 Hybridní měnič	27

3.4	Akumulace olověnými akumulátory	28
3.5	LiFeYPO ₄ baterie	30
3.6	Průtoková redoxní baterie s měničem	31
4.	Porovnání navržených variant dle technických a ekonomických kritérií.....	34
4.1	Srovnání kritérií.....	34
4.2	Srovnání technických kritérií	34
4.3	Srovnání finančních kritérií.....	40
Závěr		42
Literatura		43

Seznam zkratk:

AC	Střídavé napětí/proud
DC	Stejnoseměrné napětí/proud
DOD	Hloubka vybití baterie (Depth of Discharge)
FVE	Fotovoltaická elektrárna
HDO	Hromadné dálkové ovládání
Li-on	Lithiová baterie
LiFeYPO ₄	Lithiová trakční baterie
MPPT	Sledování maximálního bodu výroby výkonu (Maximum power point tracking)
NN	Nízké napětí
Pb	Olověná baterie
TUV	Teplá užitková voda
VN	Vysoké napětí
VR	Vanadová redoxní
VRB	Vanadová redoxní baterie
VTE	Větrná elektrárna

Seznam ilustrací:

Obr. 1 - Ostrovní systém Fotovoltaické elektrárny	2
Obr. 2 - Mapa intenzit slunečního záření (pro optimální úhel náklonu)	3
Obr. 3 - Denní průběh výkonu FVE	4
Obr. 5 - Aktuální umístění VTE v ČR	5
Obr. 4 - Místa vhodná pro výstavbu větrných elektráren	5
Obr. 6 - Geotermální teplárna v Semilech	6
Obr. 7 - Francisova turbína	7
Obr. 8 - Peltonova turbína	7
Obr. 9 - Kaplanova turbína	7
Obr. 10 - Olověný akumulátor	9
Obr. 11 - NAS akumulátor	10
Obr. 12 - CAES elektrárna s podzemním zásobníkem	11
Obr. 13 - Výroba vodíku různými prostředky	13
Obr. 14 - Elektrolýza vody	14
Obr. 15 - Palivový článěk	15
Obr. 16 - Vanadiová redoxní baterie	16
Obr. 17 - Stávající konstrukce FVE	19
Obr. 18 – Denní průběh výkonů	20
Obr. 19 – Průběh výkonů FVE za tři týdny	20
Obr. 20 - Měsíční srovnání vyrobené energie	21
Obr. 21 – Srovnání spotřeby v měřeném období	22
Obr. 22 – Srovnání denních průběhu v náhodných dnech	23
Obr. 23 – Hybridní fotovoltaická elektrárna	24
Obr. 24 – Ostrovní fotovoltaická elektrárna	24
Obr. 25 - Denní průběh výroby a spotřeby s akumulačním systémem (bez účinnosti)	25
Obr. 26 - Průběh nočního vybíjení akumulátoru (bez účinnosti)	26
Obr. 27 - Blokový návrh akumulačního systému (černá – silová kabeláž, červená – komunikační kabeláž)	28
Obr. 28 - Srovnání technických parametrů akumulačních systémů	39
Obr. 29 - Srovnání ekonomických parametrů akumulačních systémů	40

Seznam tabulek:

Tab. 1 - Vodní turbíny	6
Tab. 2 - Srovnání parametrů superkapacitorů a Li-ion baterie	12
Tab. 3 - Typy a parametry palivových článků	14
Tab. 4 – Srovnání jednotlivých akumulačních prvků	17
Tab. 5 – Parametry instalované elektrárny	19
Tab. 6 – Výroba elektrické energie	21
Tab. 7 – Spotřeba elektrické energie	23
Tab. 8 - Akumulační kapacita	26
Tab. 9 - Parametry měniče	27
Tab. 10 - Parametry článku olověné baterie	29
Tab. 11 - Parametry článku LiFeYPO ₄	30

Tab. 12 – Parametry VRB akumulace IMERGY ESP30	32
Tab. 13 - Hodnoty určení instalovaného výkonu článků.....	32
Tab. 14 - Tabulka účinností pro srovnání.....	34
Tab. 15 - Hodnoty pro výpočet energetické bilance	36
Tab. 16 - Cena jednotlivých prvků akumulace.....	40

Úvod:

Tato bakalářská práce je zaměřena na řešení problému přebytku a nedostatku elektrické energie vyrobené alternativními zdroji. Alternativní zdroje lze rozdělit na dvě pomyslné skupiny, a to podle stability dodávky energie. Ideálním případem pro elektrickou přenosovou soustavu by bylo využití pouze stabilních a přitom regulovatelných alternativních zdrojů, například malých vodních elektráren s rychlou regulací. V praxi ovšem nelze využívat pouze tento druh elektráren, ale je třeba využívat veškeré možné zdroje, a tím snížit spotřebu fosilních paliv. Nabízí se tedy využití slunečního záření, ať už ve formě světla nebo teplem způsobeného proudění vzduchu. Tyto energie jsou ovšem nestabilní. Větrné elektrárny jsou závislé na síle a směru větru. Fotovoltaické panely zase na intenzitě slunečního záření. Přírodu ovládat nemůžeme, jsme schopni pouze odhadovat její chování. Meteorologii lidé využívají již tisíce let, ale ani s pomocí moderních technologií nejsme schopni určit s minutovou přesností výskyt větru nebo vznik oblačností, z čehož bychom byli schopni pokrývat výkyvy v přenosové soustavě. Proto se zde zabývám možnostmi akumulace energie.

Z pohledu energetické sítě zde máme zdroje základní (špatně regulovatelné), pološpičkové a špičkové. Za špičkové můžeme považovat vodní přečerpávací a plynové elektrárny. V budoucnu bychom mohli k tomuto přidat ještě elektrárny na bázi vodíku (palivové články) nebo stlačeného vzduchu (CAES elektrárny). Pro malé ostrovní systémy využijí buďto akumulátorů, popřípadě v budoucnosti superkapacitorů nebo ukládání energie v magnetickém poli cívky.

V této práci budou popsány jednotlivé známé možnosti akumulace energie a výběr prozatímni nejlepší možné technologie pro ostrovní síť. Dále návrhy akumulace pro vybraný alternativní zdroj, srovnání dle účinností, finanční stránky a délky bezúdržbového provozu.

1. Alternativní zdroje

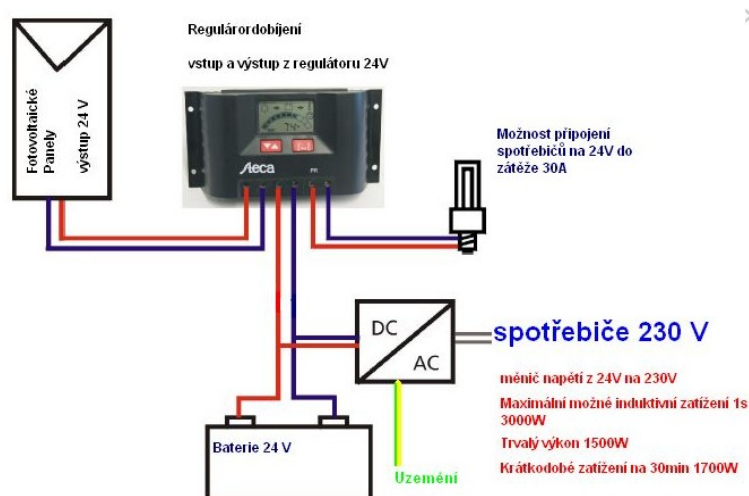
1.1 Alternativní zdroje

Vodní zdroj energie člověk využívá již od starověku. Tato energie byla mechanická a usnadňovala práci rolníkům, kovářům, později také dřevozpracujícím závodům atd. Byl to přírodní, levný a dále taky jediný využitelný zdroj. Postupem času, příchodem parní éry, vynálezem dynama a celkovým rozvojem elektrických zařízení se od přímého využití mechanické energie vody upustilo a přešlo se k elektrickým pohonům. Bylo vystavěno velké množství tepelných elektráren, aby byla pokryta spotřeba. S dnešní stále rostoucí poptávkou po elektrické energii nemůžeme jen stavět nové a nové tepelné popřípadě jaderné elektrárny, ale je třeba začít více využívat přírodní zdroje.

Za alternativní zdroje považujeme zařízení pro přímou nebo nepřímou přeměnu sluneční energie na elektrickou, popřípadě tepelnou. Přímá přeměna probíhá například u fotovoltaických panelů, kde je přímá závislost výroby na intenzitě světla. Dále bychom do této kategorie mohli zahrnout částečně i větrné elektrárny, jelikož slunce ovlivňuje přímo vzdušné proudění. Narozdíl od toho nepřímé využívání energie lze označit jako akumulární. Ať už se jedná o vodní elektrárny, nebo využití biomasy v různých provedeních, vždy jsme schopni určit, zda máme dostatek paliva popřípadě vody v nádrži a regulovat výkon podle potřeby v nepřetržitém provozu.

1.2 Solární energie

Tato energie stojí za vznikem života a provází nás již miliardy let. Na povrchu slunce dochází k jaderné fúzi a obrovské emisivité energie dopadající na zemi. Všechny zdroje jsou závislé ať přímo nebo nepřímo na solární energii. Pro přímé zachycení solární energie a její přeměnu na elektrickou energii je využíváno tzv. „Fotovoltaických panelů“. Jsou to panely složené z více polovodičových desek. Při dopadu světla na tyto desky vzniká na elektrodách polovodičového PN přechodu rozdíl potenciálů, přibližně od 0,6 do 0,7V. Za provozu se jedná o velice čistý zdroj. Další výhodou tohoto zdroje je jednoduchá a ekologická výroba. Dokonce i likvidace nepředstavuje největší problém, jelikož



Obr. 1 - Ostrovní systém Fotovoltaické elektrárny [14]

materiály lze znovu využít. Největší problém představuje plocha, která je přechodně zničena. V České republice je vidět mnoho polí, na kterých jsou tyto elektrárny umístěné, místo toho abychom zde pěstovali potraviny. Perspektivnější využití této technologie vidím v umístění na střešních plochách budov, kde nikomu nepřekážejí, a jedná se o malé zdroje v řádech kilowattů, čímž nebudou vznikat výkyvy v síti, nebo ještě lépe budou pracovat v režimu ostrovního provozu (Obr. 1).

Velkou nevýhodou těchto elektráren je také použití elektronického střídače napětí. Bohužel jedná se o modulovanou sinusoidu, která nikdy nebude odpovídat sinusoidě synchronního stroje. Tímto se do sítě dostávají rušivé harmonické složky. [4]

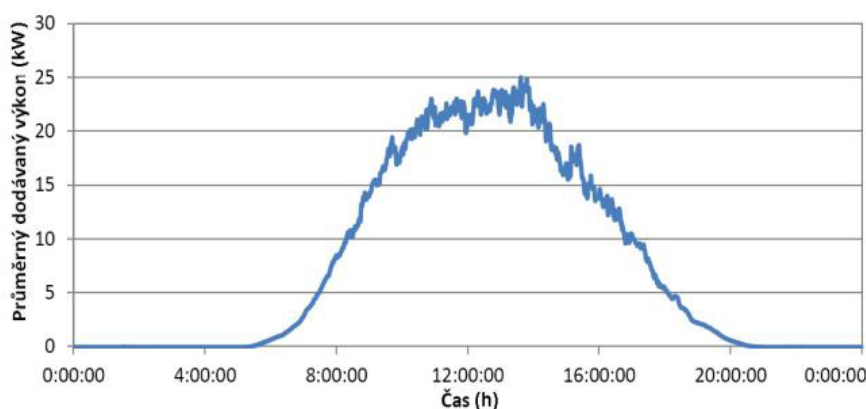
Aktuálně máme 3 druhy fotovoltaických panelů. Monokrystalické, polykystalické a amorfni. Monokrystalický panel je zatím nejúčinnější typ, co se týče výkonu na plochu, zato jsou náchylné na úhel dopadajícího záření. Druhým typem jsou polykystalické panely. Tyto panely mají sice menší účinnost, ale zase jsou schopny zachytit i slabší intenzity záření a nevadí jim větší odklon od směru záření. Amorfni fotovoltaické panely se vyznačují malou účinností oproti výše zmíněným typům. Zato jsou schopny zachytit i difuzní záření a pracovat i v zamračeném počasí. Pro srovnání výkonů na jeden monokrystalický panel je potřeba asi 2 až 2,5 amorfniho. [5][6]

Co se týče umístění České republiky a jejího klimatického podnebí, není zde ve většině míst ideální prostředí pro fotovoltaické elektrárny, viz (Obr. 2).



Obr. 2 - Mapa intenzit slunečního záření (pro optimální úhel náklonu) [16]

Jak můžeme vidět v naší kotlině je nejvyšší intenzita v okolí Brna až ke Zlínu. Malé oblasti poté v okolí Českých Budějovic. Dále (Obr. 3) je vidět denní průběh výkonů. Podle situovanosti polohy elektrárny se bude měnit maximum v grafu. Máme-li natočenou elektrárnu přesně na jih, mělo by se maximum nacházet přesně v poledne. To samozřejmě platí pouze za ideálního počasí. [14][15][18]



Obr. 3 - Denní průběh výkonu FVE [18]

1.3 Větrná energie

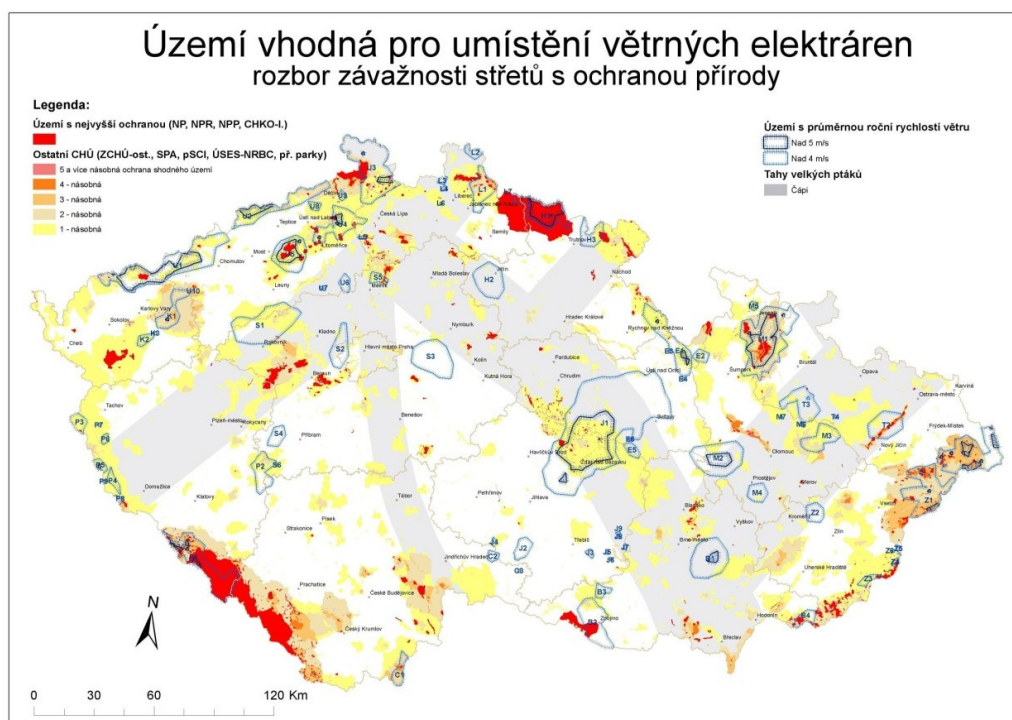
Získávání této energie je založeno na proudění teplého a studeného vzduchu, jeho zachycení a transformaci. Větrná energie byla v dávných dobách využívána v mlýnech k mletí mouky. Dnešní využití této energie musí být ovšem širokospektré. První lopatky větrných mlýnů byly ploché a velice málo účinné, cca. 20% a méně. Změna přišla s využitím vrtulí na bázi vztlačového principu. Tato technologie pozvedla účinnost transformace energie na 50% a více. Rychlost otáčení je závislá na počtu lopatek, tedy čím méně je lopatek tím vyšší rychlost otáčení. O tom vypovídá tzv. „koeficient rychloběžnosti“, což je poměr obvodové rychlosti křídel k rychlosti větru. V praxi se používají jen 2 nebo 3 lopatky. [22]

Jelikož elektrárna musí pracovat i s vysokými otáčkami vyvolanými silným větrem, při klidném větru poklesnou otáčky, čímž by nebylo možno elektrárny využívat. Doplněním elektrárny o převodovku mezi vrtulí a generátorem, popřípadě měničem kmitočtu je problém vyřešen.

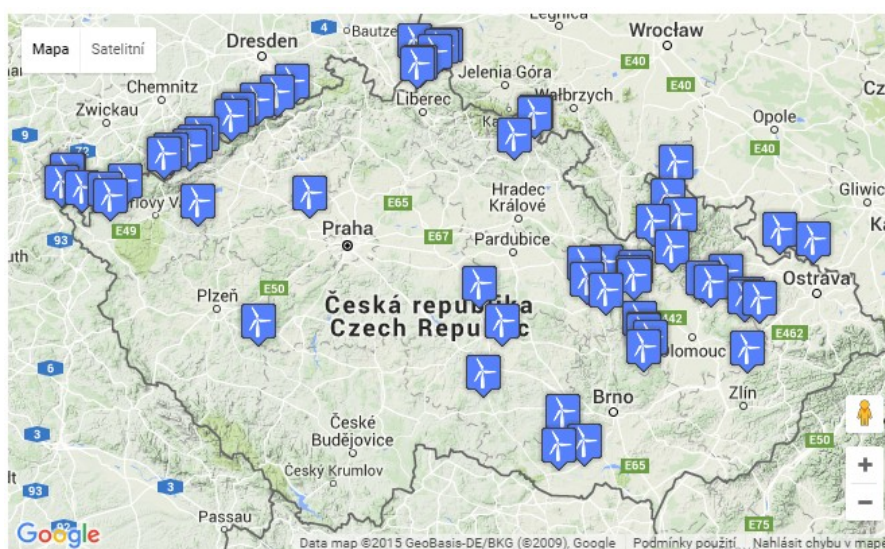
Regulace výkonu je možno provádět těmito způsoby:

- regulace odtržením proudu na listech vrtule s konstantním úhlem nastavení listů
- regulace přestavováním listů vrtule na větší úhly nastavení a tím snížení vztlačové síly a výkonu
- regulace přestavováním listů vrtule na menší úhly nastavení a tím snížení vztlačové síly, zvýšení odporu a pokles výkonu

V České republice se příliš oblastí pro tyto elektrárny nenachází, vzhledem ke stabilnímu proudění větru a chráněným krajinným oblastem (Obr. 4). Většina oblastí je situována v hornatém terénu (Obr. 5). Ve světovém měřítku lze tyto elektrárny používat nejen na pevnině ale i v mořích, kde nevznikají takové rušivé vlivy na prostředí jako v obydlené oblasti.



Obr. 4 - Místa vhodná pro výstavbu větrných elektráren [19]



Obr. 5 - Aktuální umístění VTE v ČR [23]

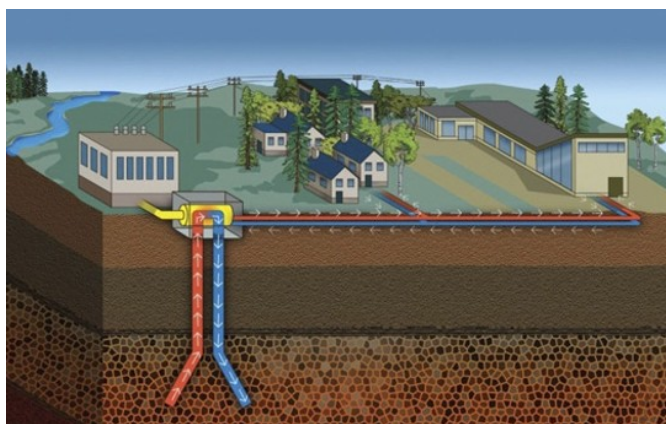
Elektrárny jsou připojovány podle výkonu buďto k dostatečně tvrdým sítím NN, nebo u vyšších výkonů přes transformátory k síti VN. Velký problém u větrných elektráren je tzv. „flicker“, neboli okem pozorovatelné kolísání světla ze světelných zdrojů. Tohle kolísání je způsobeno změnou výkonu vrtule v době, kdy se za lopatkou nachází ve svislé poloze věž bránící proudění větru, popřípadě poryvům větru. Frekvence tohoto kolísání je okolo 2-3 Hz. Dále je zde negativním aspektem nestabilita dodávky v závislosti na meteorologických podmínkách. Nejhorším možným výkyvem tohoto typu je příchod bouře s velmi vysokým větrem přesahujícím maximální provozní hodnotu elektrárny, kdy musí bezpodmínečně dojít k odstavení elektrárny. Vzhledem k výkonům elektrárny až v řádech MW se jedná o velké výkyvy. Proto také u elektráren nad 2,5 MW provozovatel distribučních sítí vyžaduje dálkovou telemetrii pro řízení výkonu. [4][7][9]

Elektrárny tohoto typu jsou nejen vrtulového typu s horizontální osou, ale využívají se i jiné typy s vertikální osou pro menší zdroje.[3]

1.4 Geotermální energie

Energie je získávána z jádra země. V oblastech se zvýšenou vulkanickou aktivitou se podzemní voda ohřívá a objevují se tzv. gejzíry. Díky vysoké teplotě ve velké hloubce se zde objevuje pára, která pohání nainstalované turbíny. Buďto tedy využíváme páry přímo z gejzírů, nebo čerpáme vodu do podzemí a ohříváme ji.

Odhadovaný instalovaný výkon na Zemi je 8 GW. Nevýhodou geotermálních elektráren je jejich výstavba pouze ve vulkanických oblastech, dále pak vysoká cena (5x dražší než jaderná elektrárna), velikou výhodou je ovšem čistota této energie. Tyto elektrárny jsou stavěny na Islandu. Zde se používají jak k vytápění domů, tak i k výrobě elektrické energie. Dále pak v Itálii, Francii, na Novém Zélandu, Mexiku a jiných zemích. V naší zemi se budují projekty pro vytápění měst. V Litoměřicích by měl v roce 2016 vzniknout vrt sahající do hloubky 5 – 6 km, z něhož by měla vycházet voda o teplotě 150 - 180 °C. Dále se uvažuje o výstavbě v Smilech na Liberecku (Obr. 6) [3][24][25].



Obr. 6 - Geotermální teplárna v Semilech [25]

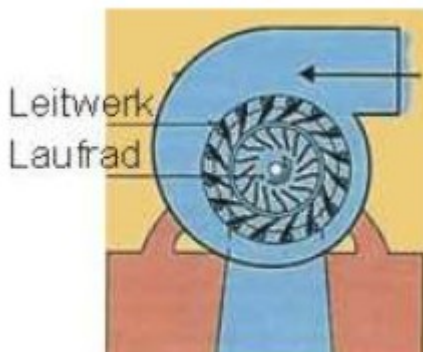
1.5 Vodní energie

Tento alternativní zdroj má u nás velmi hojné zastoupení. Zachycování této energie se provádělo ve starších dobách „mlýnským kolem“. Po vynálezu turbín byla tato energie výhradně transformována do podoby elektrické (hydroelektrárny). Podmínkou pro výstavbu je velký spád popřípadě velký průtok vody. Od tohoto je také odvozeno použití jednotlivých turbín. Speciálním případem vodní elektrárny je přečerpávací vodní elektrárna (popsaná v kapitole 2.7). Na světě existuje řada turbín. Zde (viz Tab. 1) jsou uvedeny pouze nejpoužívanější:

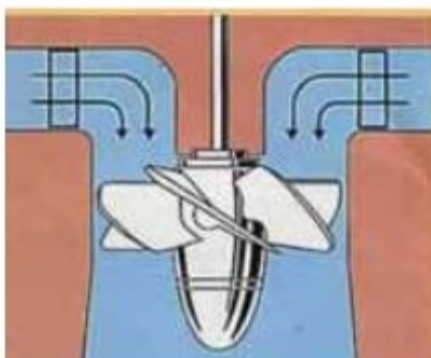
Tab. 1 - Vodní turbíny

Typ	Spád (m)	Výkon (kW)	Kategorie
Peltonova turbína	50 – 1500	$100 - 3 \cdot 10^5$	Rovnotlaké
Kaplanova turbína	5 - 75	$200 - 1 \cdot 10^5$	Přetlaková
Francisova turbína	10 – 800	$100 - 3 \cdot 10^5$	Přetlaková

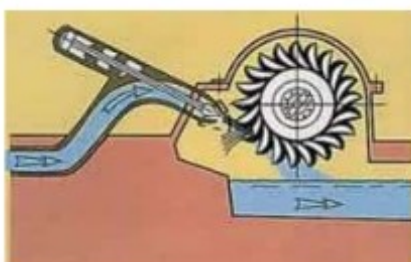
Rovnotlaká turbína (Obr. 9) využívá energii proudění vody, kdežto přetlaková (Obr. 7 a Obr. 8) využívá tlaku vody. Od toho se odvíjí i výška spádu[26][27][28] .



Obr. 7 - Francisova turbína [28]



Obr. 9 - Kaplanova turbína [28]



Obr. 8 - Peltonova turbína [28]

2. Systémy akumulace energie z alternativních zdrojů pro ostrovní sítě

2.1 Fluktuace, ostrovní síť

Jako fluktuaci lze označit výkyvy a nestabilitu dané veličiny, v našem případě výkonu. Tato nestabilita vzniká jak u spotřebičů, používáním během dne, tak i nestabilitou alternativních zdrojů.

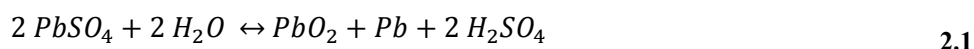
Pod pojmem ostrovní síť si můžeme představit jeden nebo více objektů, například vesnici, která je nezávisle elektricky napájena z alternativního zdroje bez připojení ke globální distribuční síti, nebo je tato síť použita pouze pro havarijní případy výpadku zdrojů. Pokud by se jednalo například o vodní nebo geotermální energii, jsme schopni ze zdroje nepřetržitě dodávat elektřinu bez nutnosti akumulace, popřípadě pokrývat akumulací pouze denní špičky. Podmínkou je rychlá a široká možnost regulace výkonu. Využívá-li nestabilních zdrojů, je nutnost akumulace nevyhnutelná. Častější použití takovýchto ostrovních sítí ale nalezneme v malém měřítku (rodinné domy, malé firemní provozovny). Zde je jako zdroj využit fotovoltaický systém s akumulací. Akumulace pokryje denní výkyvy a zároveň zabezpečí i noční napájení. Zároveň musí být akumulace navržena tak, aby pokryla zamračené dny v zimním období. [29][30]

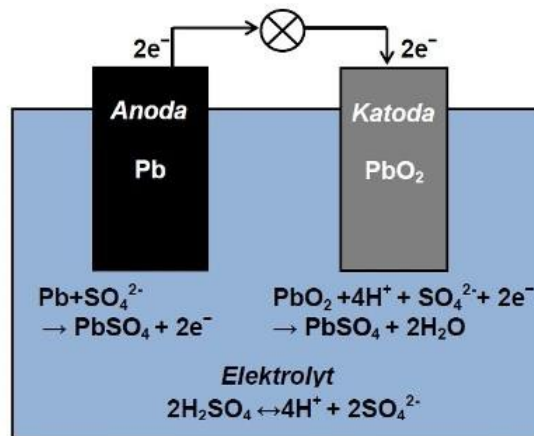
2.2 Elektrochemická akumulace

Touto akumulací se myslí chemické přeměny uložení a následnou výrobu elektrické energie chemickou reakcí. Akumulátory mají dvě elektrody z různých materiálů, mezi nimiž tato reakce probíhá. Tato akumulace je výhodná pro malé ostrovní systémy, jako karavany, rodinné domy a chaty nebo možné použití v automobilech ke startování. Kapacita akumulátoru se udává v ampérhodinách (Ah). Tato jednotka určuje, jak dlouho jsme schopni odebírat proud, než napětí na článku klesne na minimální přípustnou mez. Čím déle je akumulátor provozován, tím více klesá tato kapacita. Na tento pokles má veliký vliv přebíjení, podbití, teplota, cyklování baterie, provoz, kvalita a typ baterie.[1][29]

2.2.1 Olověné akumulátory

Akumulátory na bázi tekutého elektrolytu (H_2SO_4), popřípadě gelového elektrolytu a dvou elektrod olověných (Obr. 10). Dnes nejrozšířenější akumulátor. Nalezneme ho v mnoha automobilech, UPS zdrojích, vlacích dokonce i jako startovací napájení pro paroplynovou elektrárnu v případě studeného startu, kdy nastane tzv. „blackout“. Chemickou reakci při nabíjení (zleva doprava) lze popsat takto:





Obr. 10 - Olověný akumulátor [29]

Když se akumulátor nabíjí, začne se měnit síran olovnatý na olovo (záporná elektroda), oxid olovičitý (kladná elektroda) a kyselinu sírovou. Po ukončení této chemické reakce se začíná elektrolyt zahřívat a vařit, čímž se uvolňují plyny (H_2 , O_2). Větší množství nabíjených akumulátorů je nutno odvětrávat, aby nedošlo k výbuchu. Díky přebíjení se časem veškerá voda rozloží nebo odpaří, a tak se dolívá destilovaná voda. Pokud máme akumulátory typu VRLA, jedná se již o bezúdržbový systém hermeticky uzavřený. Účinnost těchto akumulátorů může dosahovat až 91%, nejnižší účinnost cca 60%. Napětí jednoho článku je 2,1 V.

Lead-Calcium baterie, tedy olověno-vápníková baterie má elektrody vyrobeny ze slitiny vápníku a olova pro prodloužení životnosti bezúdržbových baterií a nižšímu samovybíjení. [29][30][31]

2.2.2 Ni-Cd akumulátor

Nikl-kadmiové akumulátory patří mezi nejpoužívanější akumulátory pro malé zařízení. Dnes se pomalu omezuje využívání kvůli obsahu toxického a karcinogenního kadmia. Tyto akumulátory mají velice pevný obal a dlouhou životnost. Zdroj uvádí až 2000 cyklů. Další výhodou je spolehlivost i v nízkých teplotách. Nevýhodou je ovšem cena akumulátorů ve větších kapacitách a dále samovybíjení (1% kapacity za den). Napětí na jeden článek je 1,2 V. [10][29]

2.2.3 Ni-Zn a Ag-Zn akumulátory

Akumulátory s velice krátkou životností (NiZn cca 200 cyklů, AgZn cca 100 cyklů). Ovšem výhodou AgZn baterií je 3x větší kapacita oproti NiCd bateriím. U NiZn baterií je to zase vyšší napětí článku (1,6V). [29]

2.2.4 Ni-MH Akumulátory

Nikl-metal hydroxidový akumulátor je podobný Ni-Cd akumulátorům. Neobsahuje ovšem toxické látky. Kladnou elektrodu tvoří hydroxid nikelnatý, zatímco zápornou kovová slitina většinou tvořená z niklu, kobaltu, manganu, hliníku či popřípadě jiných vzácných kovů. Napětí článku je 1,2V, v chladu ($<5^\circ\text{C}$) se začínou akumulátory blokovat. Po zahřátí opět vzroste kapacita a dodávaný proud.

Dále mají jinou charakteristiku nabíjecího proudu. Zatímco u Ni-Cd baterií po nabití vzroste vnitřní odpor, u tohoto akumulátoru klesne. [29]

2.2.5 Li-ion

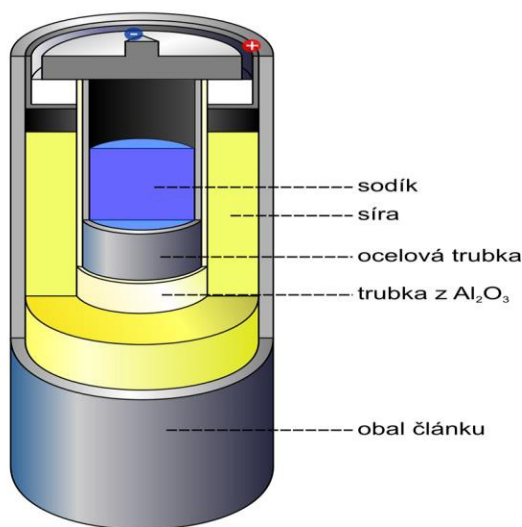
První lithiový nenabíjející se článek byl sestaven v roce 1912 chemikem Gilbertem Newtonem Lewisem. Tento článek vykazoval velkou energetickou hustotu a vyšší napětí. V 80. letech se začaly vyvíjet nabíjecí články. První články měly problémy při nabíjení, kdy došlo k reakci lithia, a baterie explodovala. Později bylo čisté lithium nahrazeno slitinami tohoto kovu, čímž došlo ke snížení energetické hustoty. Principiálně tato baterie pracuje na principu pohybujících se iontů lithia, které při nabíjení putují od kladné elektrody ($LiCoO$, $LiMnO$ nebo $LiNiO$) k záporné (uhlík), kde tvoří sloučeniny. Výsledné napětí se pohybuje okolo 3,6V (závisí na slitině). Výhodou je vysoká energetická hustota, dlouhá životnost a malá ztráta kapacity vzhledem k počtu cyklů (uvádí se 1000-1500 nabíjecích cyklů). Nevýhodou je nutnost hlídacích elektroniky proti přebíjení, nutnost dodržet maximální nabíjecí napětí 4,2 – 4,3V, jinak bude akumulátor znehodnocen. [33]

Baterie Li-Pol je rozdílná v tom, že místo elektrolytu lithiové soli je lithium navázáno v polymerickém kompozitu (obvykle v konzistenci tužšího gelu), nejčastěji na bázi oxidů polyethyenu nebo polyakrylonitrilu. Díky tomuto jsou výrobci schopni vyrábět nejen válcovité tvary, ale i ploché nebo jiné tvary. Principiálně se ovšem nic nemění. [34]

2.2.6 NAS akumulátory

Tyto akumulátory na bázi sodíku a síry pracují ve vyšších teplotních mezích (300°C) v tomto případě roztaveného sodíku (Na) a roztavené síry (S), kde sodík zaujímá místo na záporné a síra na kladné elektrodě. Mezi těmito kovy je pevný elektrolyt tvořený z látky beta oxidu hlinitého (beta-aluminy). Elektrolyt však musí být iontově vodivý, takže pro dosažení optimální vodivosti je zahříván na vysoké teploty, což je také důvod, proč s nimi pracuje. Dále musí být pevný elektrolyt neporézní a odolný vůči účinkům agresivních látek, aby se neprorazil, a také elektronově nevodivý, aby se nevybíjel.

Článek NaS



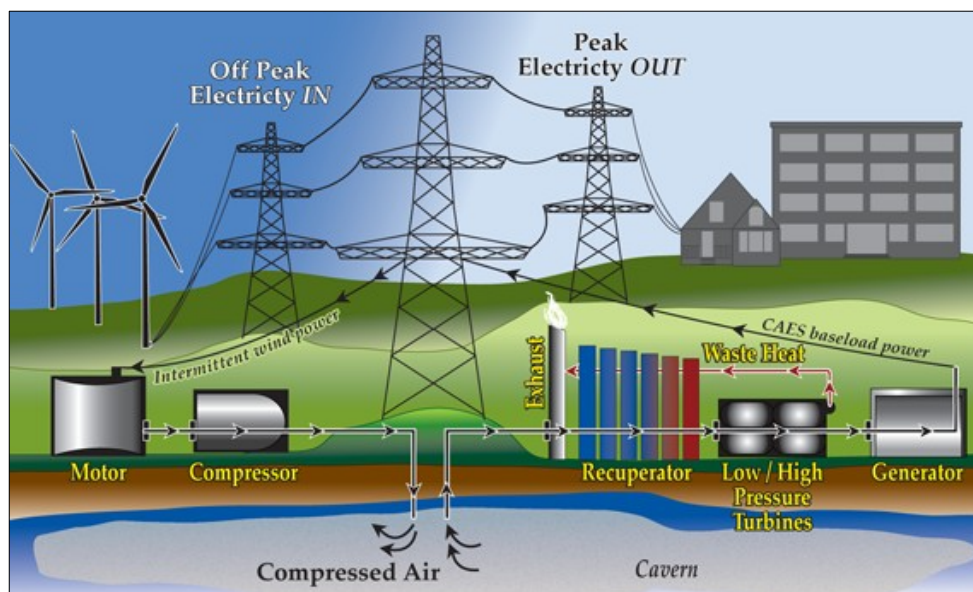
Obr. 11 - NAS akumulátor [29]

Samotný akumulátor (Obr. 11) pracuje na chemické bázi změny sulfidu na síru a přes membránu se ionty sodíku nabalují na elektrodu. Při vybíjení je tento jev opačný. Důležitou podmínkou pro vytvoření této reakce je fakt, že oba prvky musí být v kapalném stavu, proto je nutné udržovat vysokou teplotu. Výhodou je, že po prvotním zahřátí již akumulátor tuto teplotu sám udržuje, pokud je dobře tepelně izolován. Energetická hustota se pohybuje až do 730 Wh/kg. Účinnost akumulace se pohybuje až okolo 89% a akumulátor vydrží přibližně 1500 cyklů. [8][29]

2.3 CAES (compressed air energy storage)

Technologie založena na stlačení vzduchu kompresorovým soustrojím do zásobníku a následné spotřebě turbosoustrojím a generátorem k výrobě elektrické energie. Jako zásobník lze použít tlakové nádoby v malém měřítku, popřípadě ve velkém měřítku v naší oblasti využít staré vytěžené důlní štoly s patřičnou utěšňovací úpravou (Obr. 12). Tlak vzduchu se pohybuje okolo 7 MPa. Vzduch je třeba při stlačování ochlazovat a při dekompresi ohřívat, aby nedošlo k zmrznutí vodních par a následnému namrzání například na turbině. Proto se účinnost pohybuje okolo 50%. Nové akumulární elektrárny ovšem budou využívat technologii AA-CAES, využívají regenerační ohřev teplem vzniklým při stlačování pro ohřev vzduchu před dekompresí. Zde poté účinnost pravděpodobně dosáhne více než 70%. Nová technologie by měla být uvedena do provozu v roce 2016.

Velikou výhodou je rychlý start těchto elektráren, kdy doba reakce je 5 - 12 minut. Dále schopnost „studeného startu“ bez vnějších zdrojů. [13][14][35][36]



Obr. 12 - CAES elektrárna s podzemním zásobníkem [37]

2.4 Superkapacitor

Jedná se o systém založený na kapacitní baterii s kapacitou v řádech Farad. Jedná se o systémy s vysoce rychlým nabíjením a vybíjením. Velikým pokrokem v tomto odvětví jsou uhlíkové nanomateriály použité pro elektrody. Kapacita je vyjádřena rovnicí $C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{d}$, což znamená, že pro vytvoření velké kapacity potřebujeme buďto velké plochy, nebo co nejtenčí materiály dielektrika.

Pokud ovšem stáčíme tuto plochu například do svitku, je nutné mít tenké i elektrody. Jako dielektrikum je využita tenká vrstva propylenu zalitá v tekutém elektrolytu. Konstrukce je pro napětí od 2,3 do 2,75V na kapacitor. Sériovým spojením dostaneme vyšší napětí jako u baterií. V tabulce (Tab. 2) jsou uvedeny hodnoty pro srovnání s Li-ion baterií. [10][38]

Tab. 2 - Srovnání parametrů superkapacitorů a Li-ion baterie [38]

Parametr	Superkapacitor	Li-ion
Čas nabíjení	1–10 sekund	10–60 minut
Počet nabíjecích cyklů	10 ⁶ nebo 30000 h	500 a více
Napětí článku	2.3 to 2.75V	3.6 to 3.7V
Energie (Wh/kg)	5	100–200
Výkon (W/kg)	více než 10,000	1,000 do 3,000
Cena za Wh	\$20	\$0.50-\$1.00
Revizní doba	10 až 15 let	5 až 10 let
Teplota při nabíjení	–40 to 65°C	0 to 45°C
Teplota při vybíjení	–40 to 65°C	–20 to 60°C

2.5 Akumulace v magnetickém poli cívky

Akumulovat energii v magnetickém poli lze pouze za předpokladu nulového odporu v magnetickém obvodu cívky, tedy tak aby nedošlo k tepelným ztrátám, a tím ztrátám akumulované energie. Proto musí být jádro ze supravodivého materiálu. Vzhledem k tomu, že zatím žádný supravodivý materiál nepracuje při pokojové teplotě, je třeba tuto cívku chladit. Tato technologie je stále jen ve formě výzkumu a ke komerčnímu použití v malých ostrovních elektrárnách nejspíše nedojde vzhledem k náročnosti technologie. [11]

2.6 Mechanické akumulátory

Energie akumulovaná v obrovské mase hmoty setrvačníku točivého stroje jako kinetická energie. Tato technologie je již řadu let stará. Použita byla například pro pohon výtahu dolu Michal, kdy měla zabezpečit pohon výtahu po výpadku elektrické energie, tak aby bylo možno všechny horníky vytáhnout nahoru. Tehdejší stroj měl umístěný setrvačnick na hřídeli stroje v atmosféře, a tak docházelo ke ztrátám. Nynější stroje mají vysokorychlostní setrvačníky umístěny ve vakuu. Využívají se dva typy setrvačnicků. Buďto s vyššími otáčkami (100000 ot/min) a lehčí, nebo s nízkými otáčkami ale s velkou váhou hmoty. Dále se pak tyto vysokorychlostní setrvačníky ukládají na magnetická ložiska s nízkým odporem. Energie setrvačníku je vyjádřena vztahem $E_k = (1/2)J\omega$. [10][11]

2.7 Přečerpávací vodní elektrárny

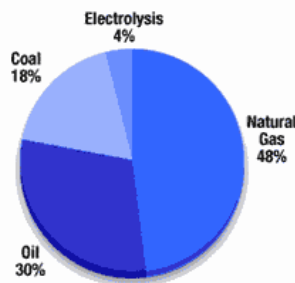
Vodní elektrárny s dvěma nádržemi (horní a dolní) mezi nimiž je velký spád. V době přebytku elektrické energie tato elektrárna čerpá vodu do horní nádrže, v době potřeby poté bere vodu z horní nádrže a pracuje jako vodní elektrárna viz. kapitola 1.5. Nevýhodou těchto elektráren je nedostatek vhodných míst vzhledem k chráněným oblastem, uzlům energetických sítí a ceně výstavby elektrárny.

Pro ostrovní systémy je tato technologie spíše nepoužitelná z finanční i prostorové stránky. Pro rozsáhlé energetické sítě je to zase jeden z mála dobře regulovatelných akumulčních zdrojů. Hojně využití v koprodukcí s jadernými elektrárnami. Dalším takovým by mohly být ještě CAES elektrárny. Účinnost přečerpávacích vodních elektráren se pohybuje okolo 75%. [27]

2.8 Vodíkové hospodářství, palivové články

2.8.1 Elektrolýza a uskladnění

Vodík je jedním z nejčistších zdrojů energie. Na zemi je zastoupen velkým množstvím vodních ploch v molekulách H_2O . Vodík vyrábíme chemicky nebo elektrolýzou vody. Zastoupení jednotlivé výroby se nachází ve výšečném grafu (Obr. 13). Další možným budoucím zdrojem vodíku mohou být jaderné reaktory 4. generace, které by mohly produkovat vodík jako doprovodný prvek.

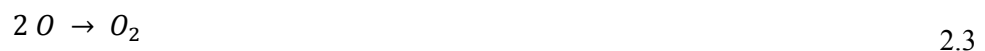


Obr. 13 - Výroba vodíku různými prostředky [40]

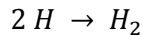
Pro akumulční systém je použitelná elektrolýza (Obr. 14). Vodík a kyslík vzniklý při této reakci kompresor stlačí do nádrží a v případě potřeby použijeme nebo přečerpáme například do nádrží autobusů nebo aut (kyslík se již neukládá). Elektrolýza je ovšem energeticky nákladná, proudová hustota se pohybuje okolo $2 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-2}$. Spojením například fotovoltaického celku s elektrolýzačním zařízením dostáváme „čistý zdroj“.



Vodivost vody zajišťuje příměs hydroxidů (KOH). Kladná elektroda je buďto z mědi, nebo niklu s povrchovou úpravou prvky manganu, wolframu nebo rutheniu. To umožňuje lehké párování kyslíku:



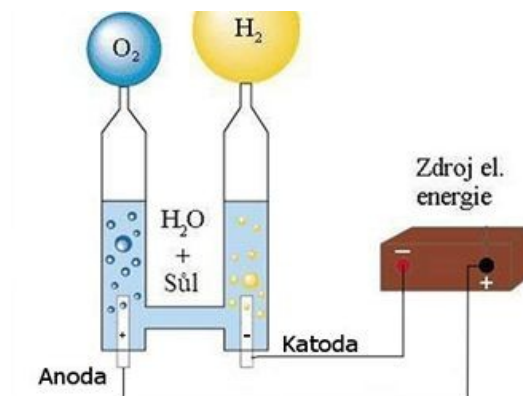
Záporná elektroda je vyrobená z niklu, který je pokryt platinovým povlakem. Platina zabezpečuje rychlé párování vodíku. Pokud by se vodík nahromadil na elektrodě, dochází ke snížení vodivosti a zastavení reakce.



2.4

Elektrolyzéry lze rozdělit do následujících skupin podle uspořádání elektrod a roztoku elektrolytu.

- Alkalické elektrolyzéry – elektrolyza z roztoku hydroxidu draselného
- PEM elektrolyzéry – membránová elektrolyza
- SOFC elektrolyzéry - na bázi pevných oxidů



Obr. 14 - Elektrolyza vody [40]

Problém nastává s uskladněním vodíku, kdy jeho atomární velikost oproti atomům železa (obyčejná ocelová tlaková nádoba) je mnohonásobně menší a tak je schopen narušovat strukturu nádoby, tzv. „difuze kovů“. Proto se i speciální nádoby musí po 10 letech vyměnit, což má vliv na náklady provozu této jednotky. [42]

2.8.2 Palivové články

Tab. 3 - Typy a parametry palivových článků

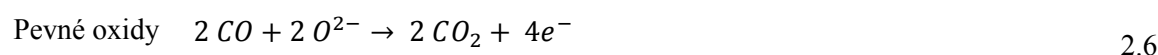
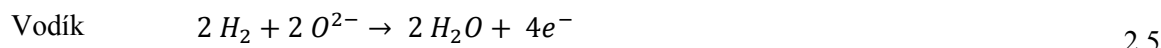
Typ:	Palivo	Teplota	Výkon	Účinnost
PEMFC	Vodík (H_2)	NT 80-100 °C VT více než 200 °C	do 250 kW	40-60 %
DMFC	Methanol (CH_4O)	60-130 °C	do 10 kW	40 %
SOFC	Na bázi pevných oxidů a vodíku	800-1000 °C	do jednotek MW	60 % Elektrická 80 % Elektrická + Teplo
AFC	Vodík (H_2)	70 °C	do 20 kW	60 %
MCFC	Na bázi pevných oxidů a vodíku	650 °C	1 MW a více	60 % Elektrická 80 % Elektrická + Teplo
PAFC	Vodík (H_2)	180 °C	100-400 kW	80 % Elektrická + Teplo

Palivový článek je elektrochemické zařízení zpracovávající kyslík a vodík, z nichž vytváří vodu a reakcí se na elektrodách objeví rozdíl potenciálů. Palivových článků je celá řada. Liší se teplotou při probíhající reakci a palivem článku (viz Tab. 3).

Princip palivového článku, jenž se nachází na obrázku níže (Obr. 15), je následující. Mezi dvěma elektrodami pokrytými uhlíkem je umístěna membrána z velmi tenkého materiálu propouštějícího pouze kladné ionty. Palivo je přivedeno na anodu, kde začne rozdělení iontů na kladné

a záporné ionty. Kladně nabité prochází membránou na druhou stranu a záporné odchází elektrodou připojeným obvodem až na katodu. Na katodě se pot služí dva atomy vodíku a jeden atom kyslíku s dvěma elektrony z katody a vznikne odpadní voda.

Chemická reakce na anodě:

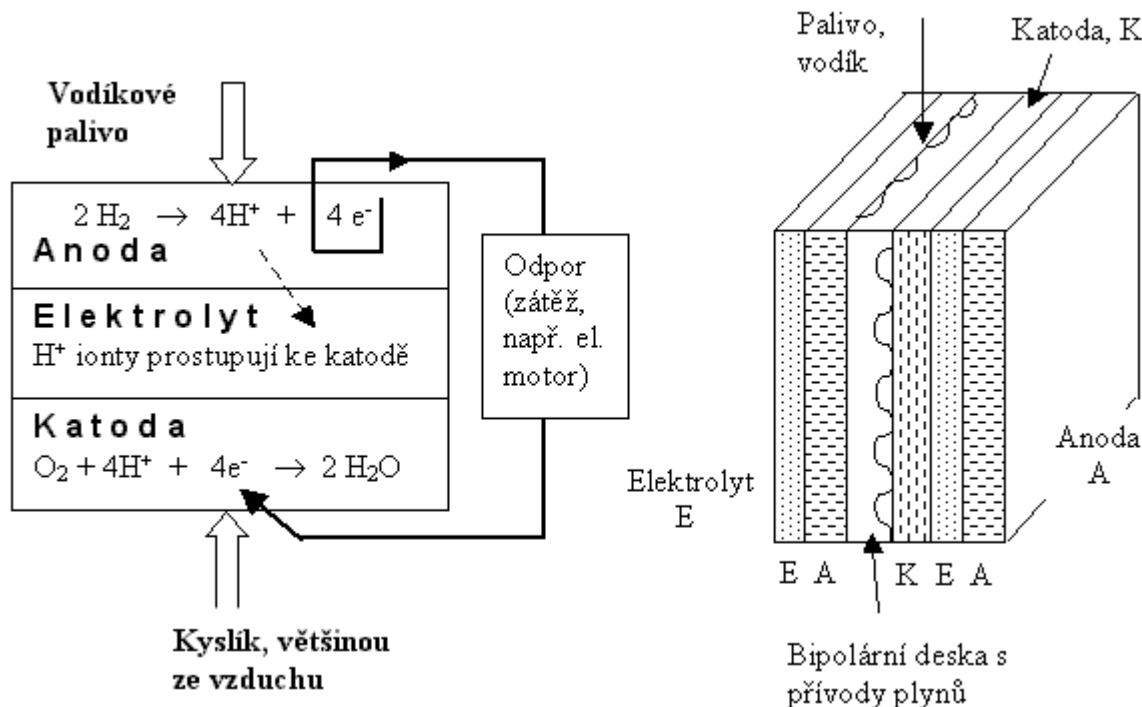


Chemická reakce na katodě:



Nevýhodou palivových článků je náročnost na čistotu paliva (kyslíku), u článků MCFC a SOFC technologie je velice náchylná na přítomnost síry v palivu. Dále pak membrána musí být schopna vydržet co největší tlak plynu a zároveň musí být co nejtenčí. V neposlední řadě i cena palivového článku nebo celé koncepce akumulace.

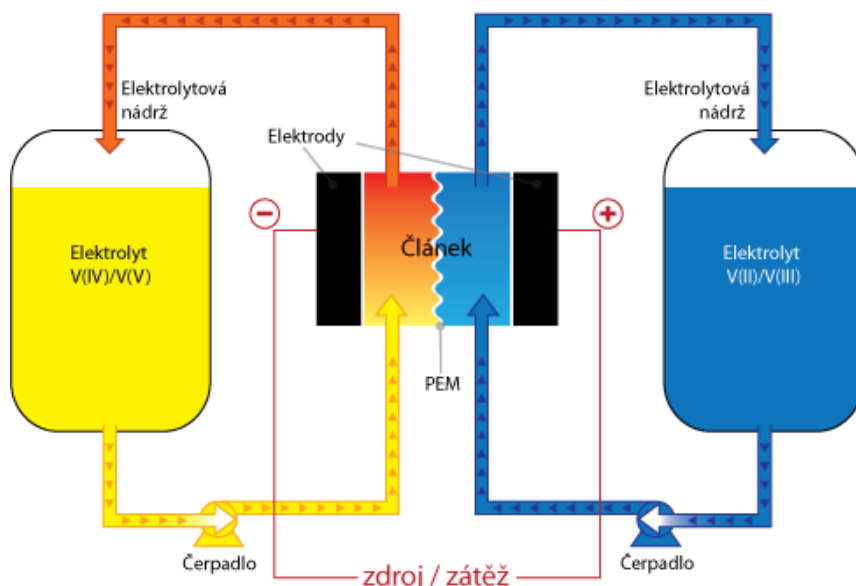
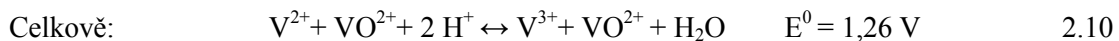
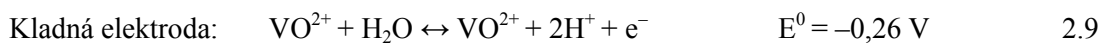
Naopak výhodou je čistota energie. Pokud je čisté palivo tak nedochází k neopotřebování membrány a systém bude mít dlouhou životnost. Dále možnost kogenerační výroby energie. Malé konstrukce by bylo možno použít i v domácnostech. [29][39]



Obr. 15 - Palivový článek [29]

2.9 Vanadové redoxní baterie

Tato baterie je založena na podobném principu jako palivové články. Nedochází ovšem k využití vodíku a kyslíku, nýbrž využívá aktivní vanadovou sůl v různých oxidačních stavech ve spojení s koncentrovanou kyselinou sírovou. Dále obsahuje uhlíkové elektrody a iontoměničovou membránu (PEM membránu). Jelikož je elektrolyt kapalný, lze jej skladovat například v odolných plastových nádobách. Do článku je tento elektrolyt pumpován čerpadly (viz Obr. 16). Výhodou tohoto systému je možnost skladování velkého množství energie v chemickém stavu s malým množstvím článků například pro dlouhodobou akumulaci. V elektrolytu nedochází k samovybíjení, jako u baterií, čímž je doba uložení energie velice dlouhá. Účinnost těchto baterií dosahuje až 85%, a to až při 10 000 cyklech životnosti baterie. Vzhledem k zatím možným prvkům akumulace je tahle technologie velice nadějná pro budoucí použití. Její nevýhodou je ovšem velikost celku na kWh oproti například LiFeYPO₄. Další velkou výhodou pro budoucí použití je absence těžkých kovů, což usnadňuje pozdější ekologickou likvidaci. Napětí jednoho článku se pohybuje od 1,2V až po 1,6V. Spojením více článků dostaneme jakékoliv žádané napětí. Toto napětí se odvíjí od chemické reakce na elektrodách. Nabíjení se provádí stejně jako u jiných typu baterií přivedením napájení na elektrody článku.[12][29]



Obr. 16 - Vanadiová redoxní baterie [29]

2.10 Srovnání jednotlivých druhů akumulátorů

Pro optimální návrh ostrovních systémů je třeba brát v úvahu různé aspekty akumulace jako účinnosti, rozměry instalovaných zařízení, počet cyklů a v neposlední řadě i cenu, přičemž hlavně cena ovlivní rozhodnutí investora. Hlavními parametry tedy jsou:

- Hustota energie [Wh/kg]
- Energetická účinnost nabíjecího/vybíjecího cyklu [%]
- Životnost v počtu nabíjecích respektive vybíjecích cyklů
- Životnost v letech [rok]
- Samovybíjení [%/měsíc]
- Rozsah pracovních teplot [°C]
- Maximální výkon [W]
- Kapacita [Ah]
- Rychlost nabíjení [h]
- Možnost recyklace [–]
- Investiční náklady – tj. cena za 1 VAh akumulační kapacity v jednom nabíjecím cyklu [Kč/(VAh)]
- Dodatečné náklady [Kč]

Požadavky na akumulátory jsou často protichůdné. Ideální akumulátor by měl mít vysokou hustotu energie, nízké investiční náklady, vysokou účinnost nabíjecího cyklu, vysokou životnost jak cyklickou, tak časovou (udávanou v letech), nízké samovybíjení, vysoký rozsah pracovních teplot, minimum doprovodných součástí (balancéry, hlídače článků) a schopnost rychlého nabíjení.

Tab. 4 – Srovnání jednotlivých akumulačních prvků [42]

	Efficiency (%)	Capacity (MW)	Energy density (Wh/kg)	Capital (\$/kW)	Capital (\$/kWh)	Response time	Lifetime (years)	Maturity	Environment impact
TES	30–60	0–300	80–250	200–300	3–50	–	5–40	Developed	Small
PHS	75–85	100–5000	0.5–1.5	600–2000	5–100	Fast (ms)	40–60	Mature	Negative
CAES	50–89	3–400	30–60	400–2000	2–100	Fast	20–60	Developed	Negative
Flywheel	93–95	0.25	10–30	350	5000	Very fast (< ms)	~ 15	Demonstration	Almost
Pb–acid battery	70–90	0–40	30–50	300	400	Fast	5–15	Mature	Negative
Ni–Cd battery	60–65	0–40	50–75	500–1500	800–1500	Fast	10–20	Commercial	Negative
Na–S battery	80–90	0.05–8	150–240	1000–3000	300–500	Fast	10–15	Commercial	Negative
Li–ion battery	85–90	0.1	75–200	4000	2500	Fast	5–15	Demonstration	Negative
Fuel cells	20–50	0–50	800–10,000	500–1500	10–20	Good (< 1 s)	5–15	Developing	Small
Flow battery	75–85	0.3–15	10–50	600–1500	150–1000	Very fast	5–15	Developing	Negative
Capacitors	60–65	0.05	0.05–5	400	1000	Very fast	~ 5	Developed	Small
Supercapacitors	90–95	0.3	2.5–15	300	2000	Very fast	20+	Developed	Small
SMES	95–98	0.1–10	0.5–5	300	10,000	Very fast	20+	Demonstration	Benign

Z tabulky (Tab. 4) lze vyvodit, které akumulační prvky jsou nejvhodnější pro malá zařízení a které pro velká. Pro menší fotovoltaickou elektrárnu vezmu pro srovnání dvě nejpoužívanější baterie (Pb, Li-on) a dále Vanadovou redoxní baterii, jenž bude později použita v návrhu. V rámci účinností cyklu (nabití a vybití) si vedou lépe olověné a lithiové články. Horní hranice dosahuje až 90%. Ovšem spodní hranice je vyšší u lithiových článků, která dosahuje 85%. Na této hranici začíná VR baterie. S nízkou účinností má ovšem výhodu nulového samovybíjení a počet cyklů se nemění vzhledem k DOD (velikost odebrané energie kapacity vzhledem ke kapacitě jmenovité). Další nevýhodou je

ovšem hustota energie. Ta je nejlepší u lithiových baterií, kdy na jeden kilogram mohou uložit 75 až 200 Wh. To nám velice snižuje velikost celého akumulačního celku. Zato cena za kW je daleko vyšší než u Pb a VR baterie. Životnost podle tohoto srovnání je přibližně stejná. Je pravdou, že u LiFePo₄ baterie počet cyklů při DOD = 80% dosahuje asi 5000 cyklů. U VR baterie je to až 10000 cyklů. Bohužel na českém trhu je zatím problém sehnat VR baterii, což taky částečně ovlivní volbu dané akumulace vzhledem k servisu a revizím. [2][8][42]

3. Variantní návrh systému akumulace pro fotovoltaický systém.

3.1 Stávající Fotovoltaický systém

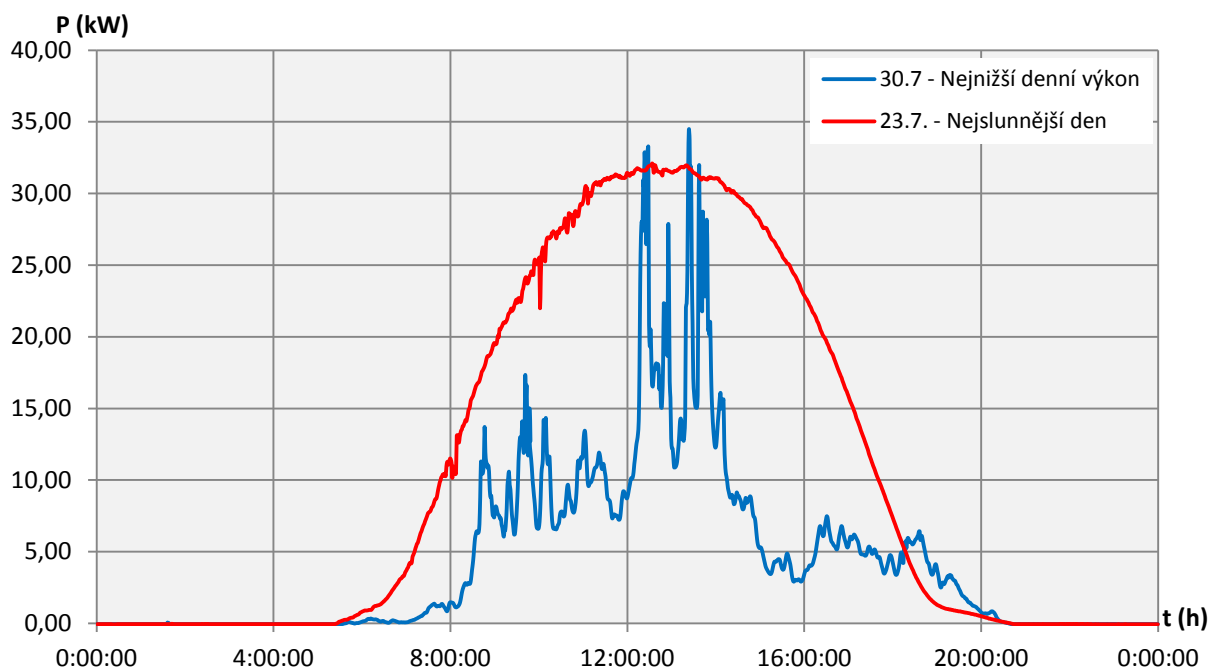
Variantní návrh bude prováděn pro stávající fotovoltaickou elektrárnu jednoho nejmenovaného objektu pracující v režimu dodávky do sítě. Blokové schéma se nachází níže (Obr. 17) Parametry elektrárny se nacházejí v tabulce níže (Tab. 5). Elektrárna je situována směrem k jihu a špička výroby se nachází podle grafu (Obr. 18) mezi 12 a 13 hodinou. Ačkoliv instalovaný výkon je 40,5 kW, skutečný výkon je nižší. Pro návrh tedy využiji měsíčního sběru dat o průběhu výkonu (Obr. 19) a dále průběh výkonu nejslunnějšího dne a nejméně slunečného dne (Obr. 18). Tato varianta předem počítá s využitím ostrovního systému pouze sezonně, hlavně tedy v letních měsících, kdy je dostatek slunečných dnů. V zimním období tedy buďto jako hybridní systém (ostrov + síť), nebo pouze s odběrem ze sítě.



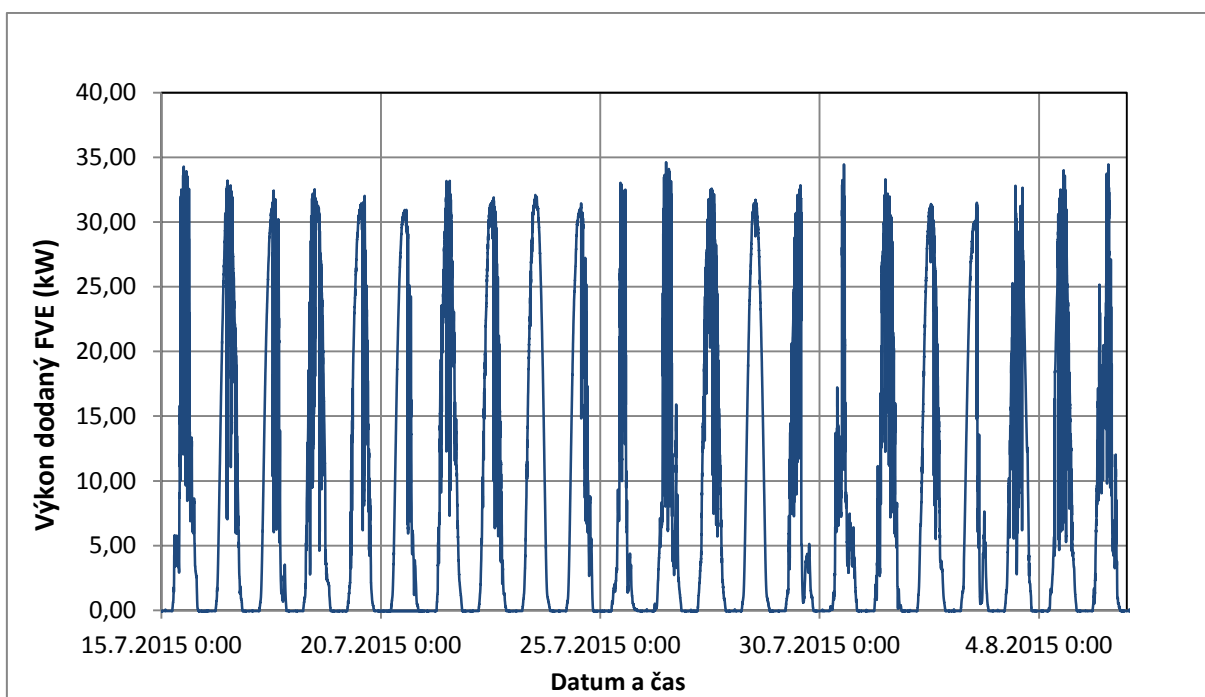
Obr. 17 - Stávající konstrukce FVE [43]

Tab. 5 – Parametry instalované elektrárny

Panel			Střídač			Instalováno		
Výkon P	300,0	Wp	U_{DCmax}	600	V	Výkon P	40,5	kW
U_{mpp}	36,3	V	U_{mpp}	230-500	V	Počet panelů	135	
I_{mpp}	8,26	A	P_{FVE}	37,8-52	kW	V sérii	9	
U_{oc}	45,5	V	I_{DC}	205	A	Paralelně	15	
I_{sc}	8,39	A	P_{nAC}	44,4	kW	U_{mpp}	326,7	V
Účinnost η	17	%	Účinnost η	95,5	%	I_{mpp}	123,9	A
			Vlastní spotřeba	15	W			



Obr. 18 – Denní průběh výkonů



Obr. 19 – Průběh výkonů FVE za tři týdny

Výpočtem sumy denních hodnot slunečního a zataženého dne dostanu skutečnou vyrobenou energii v tyto dny (3.1). Tyto hodnoty dále využiji pro návrh akumulace. Z těchto hodnot lze určit nejnížší, nejvyšší a průměrnou hodnotu (3.2) vyrobené elektrické energie. Výsledné hodnoty se nacházejí v tabulce (Tab. 6)

$$E_{dv} = \frac{\sum P_{vmin}}{n_{vz}} * 24 \quad 3.1$$

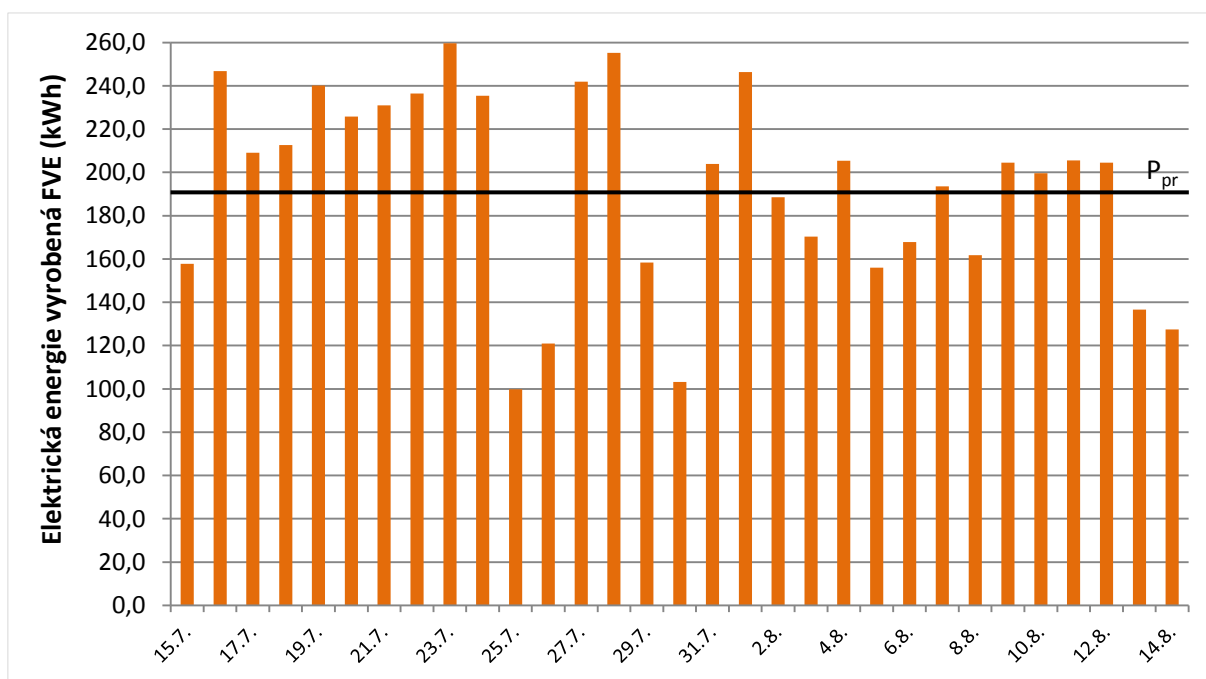
kde: E_{vd} denní vyrobený výkon (kWh),
 P_{vmin} naměřené hodnoty v minutovém intervalu (kW),
 n_{vz} počet naměřených vzorků (-).

$$E_{vpr} = \frac{\sum E_{vd}}{n_d} \quad 3.2$$

kde: E_{vpr} průměrný vyrobený výkon (kWh),
 E_{vd} denní vyrobený výkon (kWh),
 n_d počet dnů měření (-).

Tab. 6 – Výroba elektrické energie

	E (kWh)
Nejnižší denní výroba E_{vm}	103,13
Největší denní výroba E_{vM}	259,88
Průměrná denní výroba E_{pr}	193,72



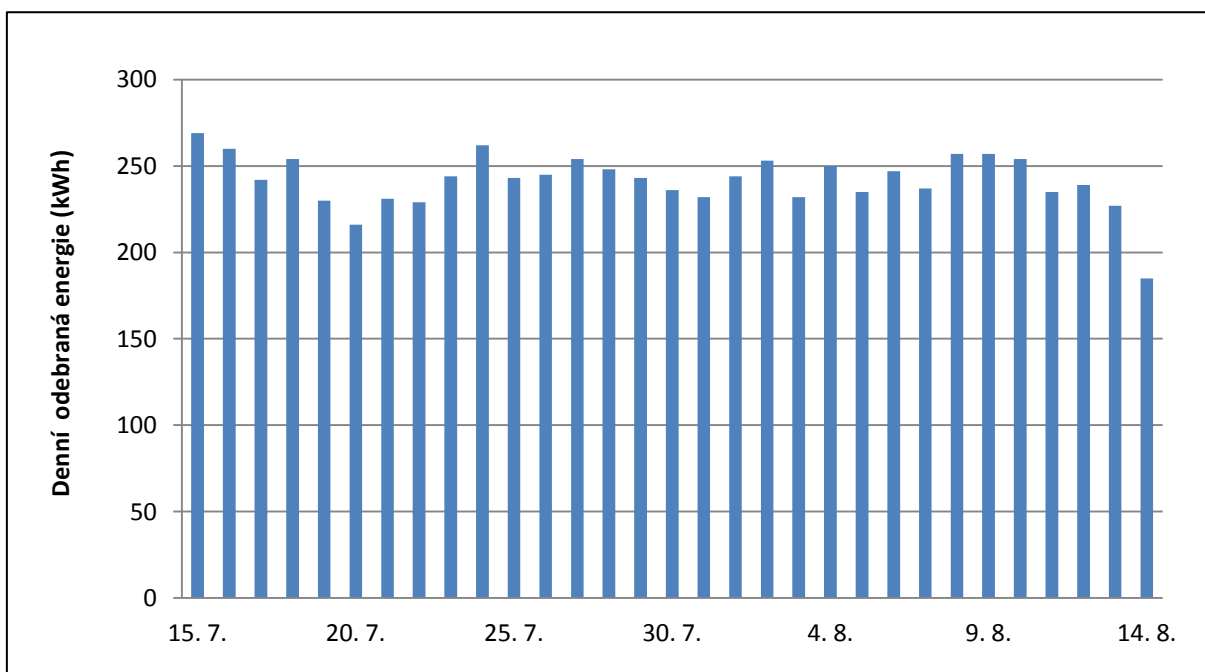
Obr. 20 - Měsíční srovnání vyrobené energie

V měsíčním srovnání vyrobené energie (Obr. 20) je na první pohled patrné, že první část měřeného období je nadprůměrně slunečná, ačkoliv se zde vyskytují i dny deštivé (nízká výroba). Tato skutečnost je důležitá při návrhu akumulace. Rozhoduje, zdali akumulace pokryje spotřebu ostrovním

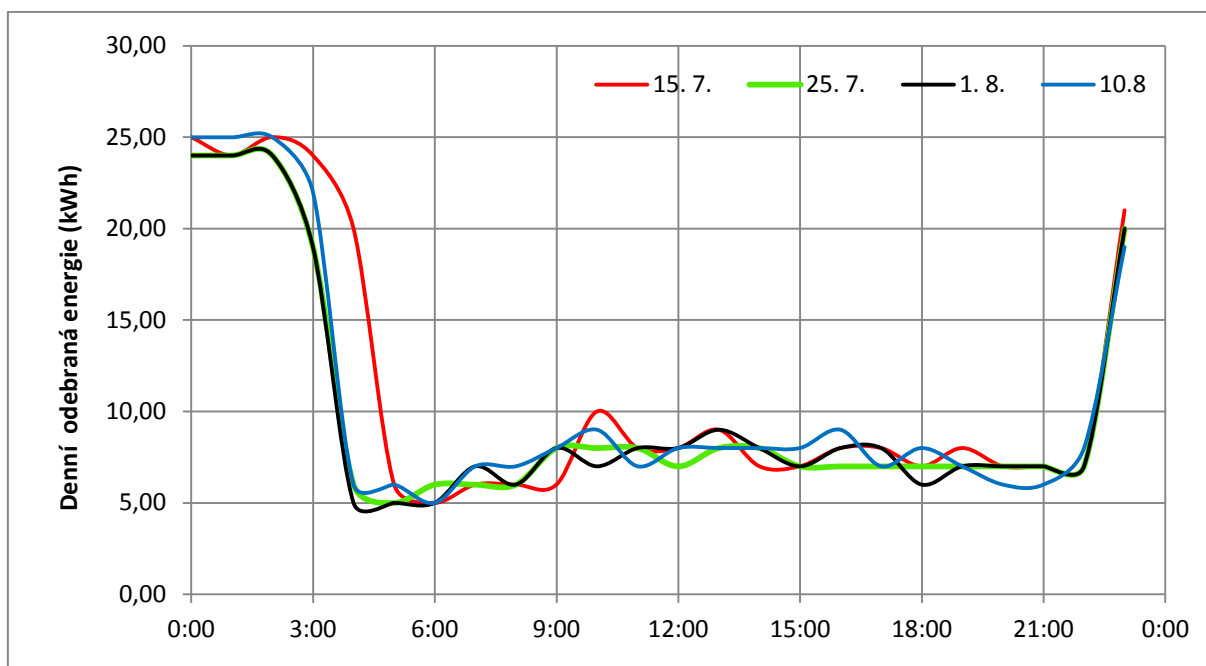
provozem i tyto dny nebo se tyto dny bude nedostatek kompenzovat odběrem ze sítě, tzv. „hybridním provozem“. V druhé části období je výroba lehce podprůměrná.

3.2 Spotřeba energie objektu

Stávající objekt (jedná se o hotel s malou ubytovací kapacitou) je připojen k elektrické síti přes čtyřkvadrantový elektroměr, který měří zvlášť dodanou energii do sítě z instalované FVE a zvlášť odběr objektu. K dispozici jsou hodinové záznamy o odběru energie ve stejném měřeném období. Jak lze vyčíst z grafu (Obr. 22) denní spotřeba je relativně stejná po celý měsíc. Pro návrh systému ovšem využijí nejvyšší možnou spotřebu. V průběhu jednoho dne (Obr. 22) se odběr mění. Největší spotřeba energie je cyklická v době od jedenácti hodin do čtvrté hodiny ranní, což zvyšuje nároky na akumulaci energie. Jednalo li by se o například ohřev TUV ovládaného HDO, stálo by za uvažování, zda by bylo možno vodu ohřívat v denní špičce výroby fotovoltaické elektrárny a snížit tak potřebnou akumulační kapacitu systému a tím i cenu zařízení, nebo zvětšit rezervu kapacity pro zatažené dny. Srovnání odebrané energie se nachází v tabulce níže (Tab. 7).



Obr. 21 – Srovnání spotřeby v měřeném období



Obr. 22 – Srovnání denních průběhu v náhodných dnech

Výpočet odebrané energie pro grafy:

$$E_{od} = \sum E_{oh} \quad 3.3$$

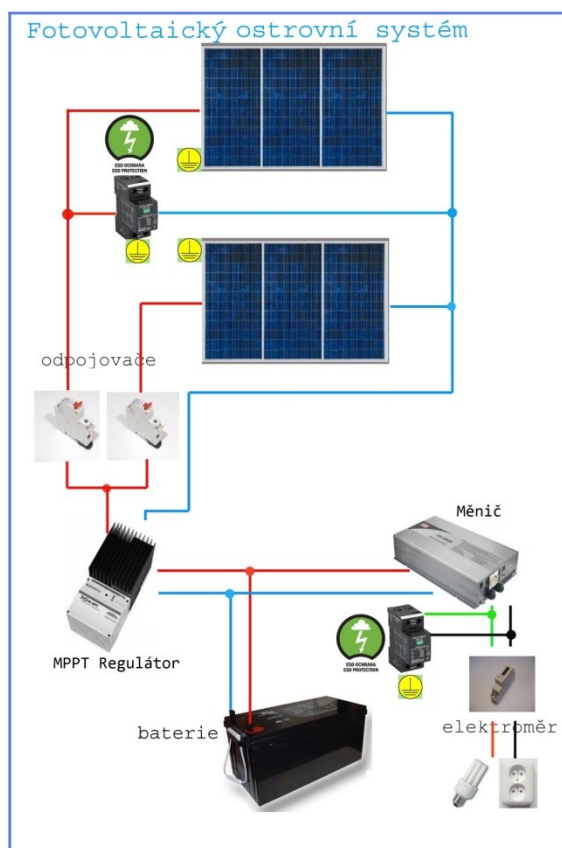
kde: E_{od} denní odebraná energie (kWh),
 E_{oh} naměřené hodnoty odebrané energie v hodinových intervalech (kWh).

Tab. 7 – Spotřeba elektrické energie za 24 hodin

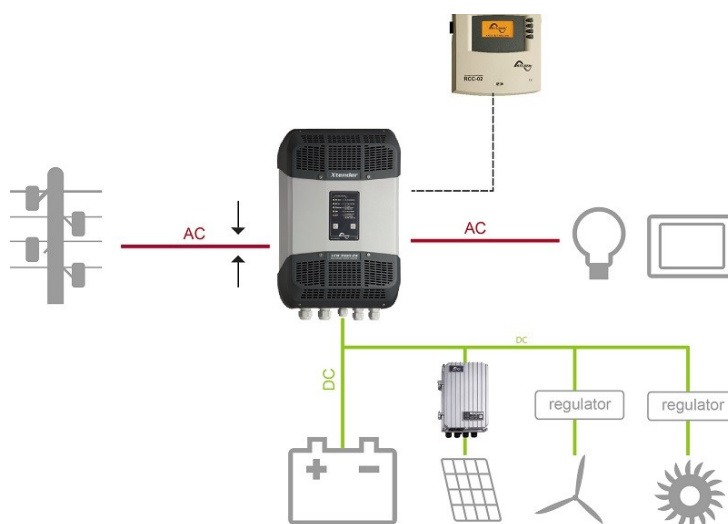
	kWh
Nejnižší elektrická spotřeba E_{om}	185
Největší elektrická spotřeba E_{oM}	269
Průměrná elektrická spotřeba E_{pr}	241,6

3.3 Akumulační systém

Systém pro ukládání přebytečné elektrické energie a pokrytí požadavku na dodávku musí obsahovat nabíjecí člen, dále měnicí nebo střídačový člen a akumulaciční člen. Jako akumulaciční člen jsou často používány různé typy chemických akumulátorů. Zde (Obr. 23 a Obr. 24) jsou blokově nakresleny verze systémů pro použití.



Obr. 23 – Ostrovní fotovoltaická elektrárna [41]



Obr. 24 – Hybridní fotovoltaická elektrárna [42]

V našem případě přichází v úvahu využití pouze hybridního systému při stávajícím instalovaném výkonu fotovoltaických panelů. Elektrárna totiž nesplňuje základní podmínku pro Offgrid systémy, a to, že nejvyšší denní hodnota vyrobená energie je větší, než maximální denní spotřeba energie se započítáním účinnosti akumulačního celku, to samé platí pro průměrné hodnoty, tedy:

$$E_{vM} > E_{oM} \quad 3.4$$

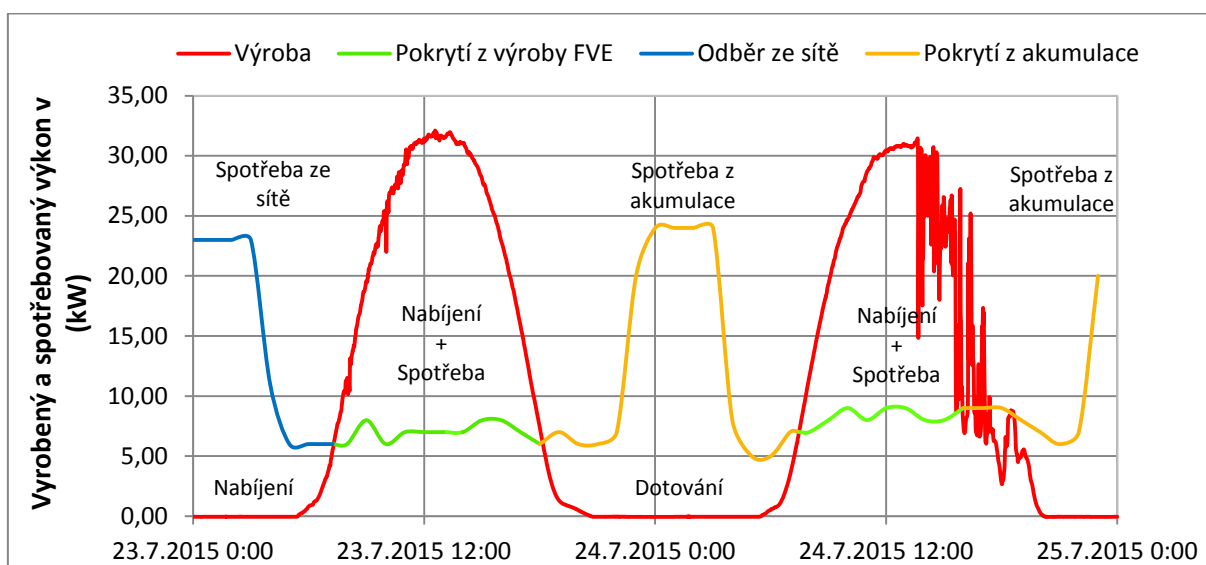
kde: E_{vM} nejvyšší denní výroba (kWh)
 E_{oM} největší denní spotřeba (kWh)

Buďto je třeba rozšířit fotovoltaickou elektrárnu, nebo snížit odběr elektrické energie například sekčním napájením částí objektu (část ze sítě, část z ostrovního systému). Dále se tedy budu zabývat pouze hybridním systémem, kdy při nedostatku dojde k řízenému přepnutí na síťový provoz.

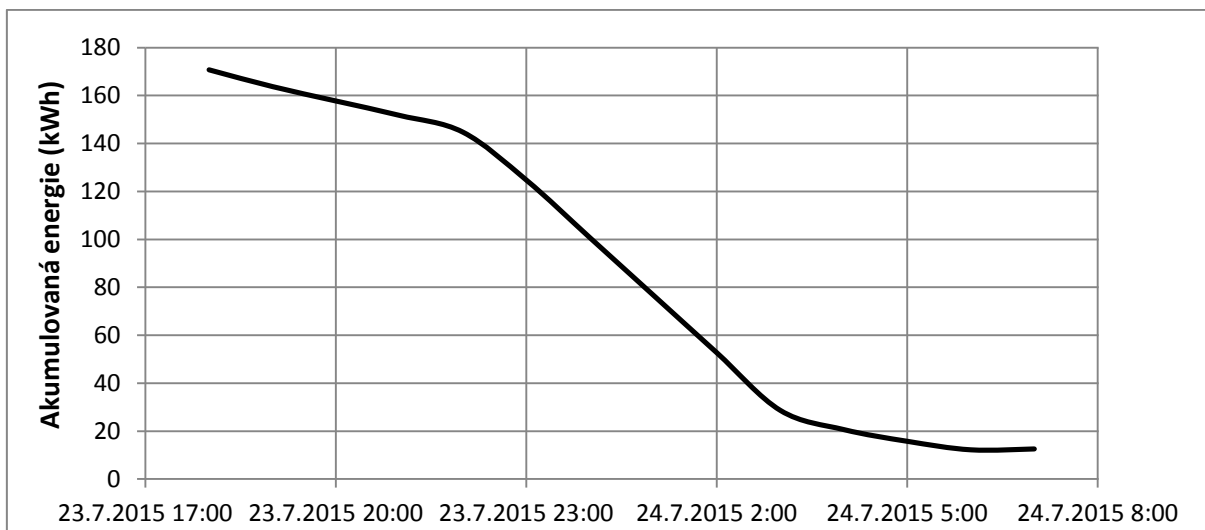
3.3.1 Denní spotřeba a přebytky

Systém pracuje tak, že při nedostatku výroby elektrické energie a zároveň vybité baterii v ranních hodinách bude ukládat energii do baterií a při přebytku bude výroba dělena na část pro spotřebu a zbytek pro akumulaci. Graf níže (Obr. 25) znázorňuje tento průběh z ideálních hodnot bez započítání účinnosti akumulačního systému. Noční provoz (Obr. 26) je pokryt z akumulace, ale zbytková energie je pod 20 kWh, což lze považovat za nulu vzhledem k účinnostem.

S vybitou baterií je napájení v síťovém režimu. Po rozednění dochází k nabíjení akumulace. Až dojde ke zvýšení výroby energie nad hodnotu spotřeby, bude spotřeba objektu pokryta z fotovoltaické elektrárny a přebytek bude akumulován. V odpoledních hodinách dochází ke klesání výroby energie, až systém přejde na akumulátorový provoz, z čehož pokrývá noční spotřebu. Nyní, do úplného západu a po rozednění, dochází k podpoře (dotování výkonem) fotovoltaickou elektrárnou pokrýt spotřebu objektu. Nízký výkon pod úroveň spotřeby objektu tedy nenabíjí baterie, ale baterie naopak dorovná výkon fotovoltaické elektrárny na hodnotu odběru objektu.



Obr. 25 - Denní průběh výroby a spotřeby s akumulačním systémem (bez účinnosti)



Obr. 26 - Průběh nočního vybíjení akumulátoru (bez účinnosti)

3.3.2 Akumulační kapacita

Nyní se zaměřím na výpočet kapacity akumulačního systému z hlediska co největšího využití vyrobené energie fotovoltaickou elektrárnou. Výsledná kapacita baterie je odvozen od denní vyrobené energie, spotřebou objektu v době výroby a dále ranní a večerní podpůrné výroby (dotování). Podpůrnou výrobu lze ovšem zanedbat jelikož se jedná vůči akumulační kapacitě o cca 6% akumulační kapacity. Vypočtené hodnoty pro akumulaci jsou v tabulce níže (Tab. 8)

$$E_k = \sum E_v - \left(\sum E_{sv} + \sum E_D \right) = 259,66 - (83 + 7,18) = 169,47 \text{ kWh} \quad 3.5$$

Kde: E_k výsledná kapacita přebytku pro baterii (kWh),
 E_v suma denní vyrobené energie (kWh),
 E_{sv} suma denní spotřeby energie v době přebytku (kWh),
 E_D suma ranní a večerní výrobní podpora akumulace v době nedostatečné výroby (kWh).

Tab. 8 - Akumulační kapacita

	Výroba E_v (kWh)	Spotřeba v době výroby E_{sv} (kWh)	Podpůrná výroba E_D (kWh)	Celkem k akumulaci E_k (kWh)
Slunečný den	259,66	83	7,18	169,49
Zamračený den	103,13	42,5	24,22	36,41

Kapacita baterie pro slunečný den se pohybuje okolo 170 kWh. Jedná se ovšem o nejslunnější den v celém období. Použití této kapacity by zařízení bylo naddimenzované, od čehož se odvíjí cena, vzhledem k hybridnímu provozu. Jednalo-li by se o offgrid provoz, bylo by tuto kapacitu nutno naddimenzovat vzhledem k pokrytí méně slunečných dnů. Pro offgrid systém ovšem není dostatečná výrobní kapacita fotovoltaické elektrárny.

3.3.3 Hybridní měnič

Pro tuto koncepci jsem zvolil měniče firmy Infinisolar, s podporou ostrovního, hybridního i síťového provozu, integrovaným MPPT trackerem a možností spojení až 3 měničů pro vyšší výkonové nároky. Měnič je samozřejmě 3 fázový s čistým sinusovým průběhem. Výhodou tohoto přístroje je univerzálnost volby baterií. Nastavitelnost dodává volnou volbu jak olovených akumulátorů tak i lithiových nebo nikl-kadmiových. Další parametry jsou uvedeny v tabulce (Tab. 9). Další výhodou tohoto měniče je režim Grid-tie, využitelný v zimním období, kdy energie z panelů bude udržovat baterie v nabitěm stavu pro případ záskoku výpadku veřejné sítě a přebytek využít pro vlastní spotřebu nebo budou tyto přebytky dodávány do sítě. [44]

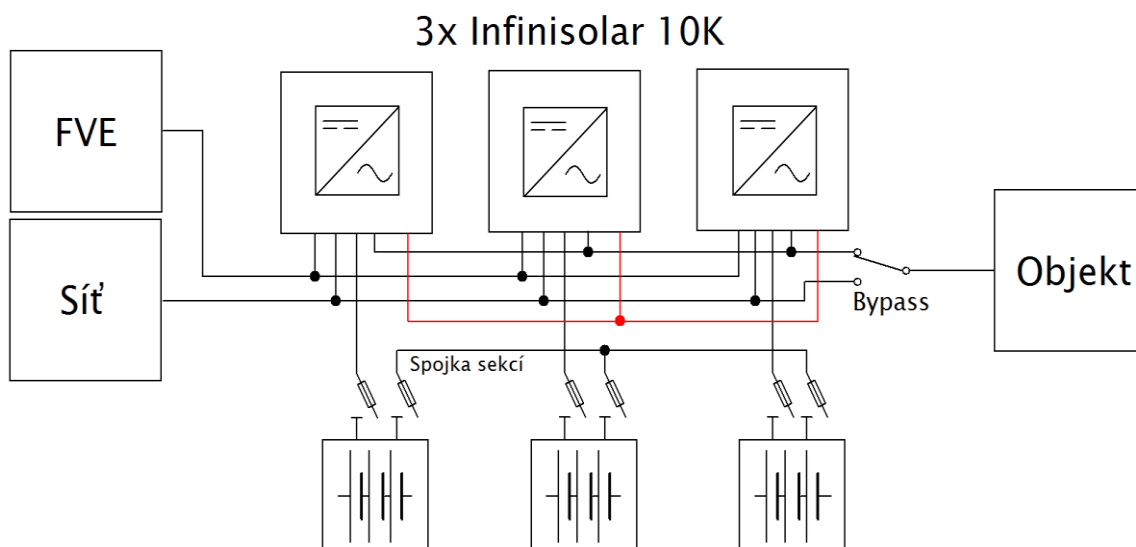
Tab. 9 - Parametry měniče [44]

Infinisolar 10K			
Výkon:	10 kW (3x3,3 kW)	Napětí baterie:	48 V
Maximální vstupní napětí panelů:	900 V	Maximální nabíjecí proud:	10-200 A
Nastavitelné napětí MPPT:	400-800 V	Výstupní napětí:	
Maximální stupňový proud:	2x18,6 A	Účinnost měniče (síťový režim):	až 95,5 %
Účinnost měniče (bateriový režim):	91 %	Cena s DPH:	104 900 Kč

Vzhledem k energetické náročnosti objektu, která se ve špičce pohybuje okolo 25 kW, a to hlavně v nočních hodinách, je nutnost užití tří měničů ve spojení. Maximální možný výkon tedy dosahuje 30 kW. Snížením hodnoty noční spotřeby a rozdělením na celodenní spotřebu by se dalo ušetřit na jednom měniči i kapacitě baterií. Nutno je dokoupit pouze další MPPT tracker pro využití veškerého instalovaného výkonu, nebo pokud to okolnosti dovolí, využít stávající střídač pro přebytečný instalovaný výkon a dodávat jej do sítě.

Druhou variantou je zakoupení tří měničů a přenesení velké noční spotřeby do denní. Zde by došlo k úspoře akumulační kapacity. Vzhledem k cenám by se jednalo o velkou finanční úsporu, jak z pohledu prvotní ceny instalace, tak i dlouhodobé údržby a výměny akumulátorů.

Třetí variantou je nemožnost upravit noční spotřebu a instalovat maximální možnou kapacitu akumulace podle přebytků výroby panelů. Finančně nejnáročnější varianta, po čase nákladná i na výměnu akumulačního prvku. Vzniká zde velká energetický úbytek způsobený ukládáním se ztrátami a následným odebráním velkého výkonu s dalšími ztrátami. Toto může rozhodovat o efektivnosti a finanční návratnosti celé instalace, což je třeba v závěru zvážit.



Obr. 27 - Blokový návrh akumulčního systému (černá – silová kabeláž, červená – komunikační kabeláž)

V blokovém schématu akumulčního systému je vidět spojení tří měničů, každý s vlastní akumulčním blokem. Spojení měničů je provedeno jak komunikační tak i silovou kabeláží, vhodně vybavenou jisticími prvky ze strany AC napájení. AC výstup je jistěn jističem umístěným na spodní straně měniče. Dále je třeba chránit vstupní obvody proti přepětí přepětovou ochranou a vhodným jisticím prvkem, nejlépe pojistkovým odpojovačem pro bezpečné oddělení panelů od měniče v rámci bezpečnosti práce a ochrany zařízení před nežádánými poruchovými stavy. Akumulční prvky jsou jistěny pojistkovými odpojovači proti nadproudovým a zkratovým poruchám ale i pro odpojení napájecího napětí od měniče v době údržby nebo oprav. Spojka sekcí je volitelný doplněk pro zimní provoz, kdy jeden měnič udržuje baterie v nabitěm stavu a zbývající pracují v síťovém režimu. Dále je zde umístěn přepínač pro přemostění měničů v případě poruchy, aby bylo zaručeno jednoduché a také rychlé přepnutí v případě poruchy měničů. Dlouhodobý výpadek trvající do příjezdu odborného servisu je nežádoucí.

Fotovoltaická elektrárna vyžaduje změnu spojení panelů a rozdělení do šesti sekcí. Každá sekce se skládá ze dvou paralelních větví, kde každá větev se skládá z jedenácti panelů spojených sériově. Tato úprava zapojení je nutná kvůli měničům a maximálnímu vstupním parametrům MPPT trackeru. Z toho vyplývá potřeba umístění akumulčního systému co nejbližší instalaci panelů. Důvodem je nová délka kabeláže, ať už z provozních důvodů nebo i z investičních.

3.4 Akumulace olověnými akumulátory

Pro první variantu akumulace budou zvoleny trakční akumulátory se zaplavenými elektrodami. Napětí baterie se odvíjí od zvoleného měniče, tedy v našem případě 48 V. Akumulátory budou ve třech oddělených blocích, pro každý měnič zvlášť. V následující tabulce níže (Tab. 10) jsou uvedeny parametry článku baterie.

Tab. 10 - Parametry článku olověné baterie [44]

Typ:	Trojan T 105 Plus	Maximální nabíjecí napětí:	7,68 V
Kapacita:	225 Ah / 20 h	Dolévání dest. vody:	Jednou za ¼ roku
	185 Ah / 5 h	Hmotnost:	28 kg
Napětí článků:	6 V	Rozměry (v,š,d):	264x181x278 mm
Počet cyklů:	1200 při DOD 50%	Cena s DPH:	5 556 Kč

Kapacita článku baterie se nyní odvíjí od denního přebytku energie. Pro moji variantu vezmu v úvahu maximální denní výrobu a nejnižší denní výrobu. Kapacita pro největší denní výrobu bude ovšem předimenzovaná vzhledem k maximu. Vstupní hodnoty přebírám z tabulky výše (Tab. 8). Tato kapacita je pro celkový bateriový komplet, pro jeden blok ji třeba ještě vydělit třemi a poté vypočítat a navrhnout skladbu bloku z článků. Vzhledem k maximální hodnotě výroby zaokrouhluji k nižšímu číslu. Kapacitu baterie volím 200 Ah vzhledem k době vybíjení menší než 15 hodin.

Akumulační kapacita:

$$C_s = \frac{E_k}{U_b * DOD_{Pb}} = \frac{169490 * 100}{48 * 50} = 7062,1 \text{ Ah} \quad 3.6$$

Kde: C_s kapacita baterie pro slunečný den (Ah),
 E_k přebytková energie (Wh),
 U_b napětí baterie (V),
 DOD_{Pb} hodnota vybití (%).

Počet paralelních větví baterie

$$n_p = \frac{C_s}{3 * C_{\check{c}}} = \frac{7062,1}{3 * 200} = 11,7 \sim 11 \quad 3.7$$

Kde: n_p počet článků paralelně (-),
 C_s celková akumulační kapacita (Ah),
 $C_{\check{c}}$ kapacita jednoho článku (Ah).

Počet sériových článků ve větvi

$$n_s = \frac{U_b}{U_{\check{c}}} = \frac{48}{6} = 8 \quad 3.8$$

Kde: n_s počet článků sériově (-),
 U_b napětí bloku baterie (V),
 $U_{\check{c}}$ napětí článků (V).

Celkový počet článků

$$n = 3 * n_s * n_p = 3 * 8 * 11 = 264 \quad 3.9$$

Kde: n celkový počet článků (-),
 n_s počet baterií sériově (-),
 n_p počet baterií paralelně (-).

Jeden bateriový blok tedy bude mít jedenáct paralelních větví a každá větev bude mít osm baterií v sérii. Celkový počet baterií je tedy 264 kusů ve třech blocích. Pro nejnižší hodnotu výroby bychom podle stejného výpočtu potřebovali celkem asi 72 baterií. V dalším posouzení je třeba vzít v úvahu nízký počet cyklů a nízkou hodnotu DOD například oproti LiFeYPO₄ baterii. Dále zde není vzata v úvahu účinnost nabíjení a vybíjení. Velkou kapacitu baterií zvětšuje nadměrný noční odběr elektřiny. Bez něj by stačila poloviční kapacita baterií. Dále by došlo i ke zvýšení účinnosti využití energie, bateriový provoz je ztrátový. Účinnost olověných akumulátorů se pohybuje od 90 do 70%.

3.5 LiFeYPO₄ baterie

Jako druhou variantu jsem zvolil lithiovou baterii s vyšší účinností (až 90%), také vyšší možností vybití baterie (DOD = 80%) a větším počtem cyklů. Parametry jednoho článku jsou v tabulce níže (Tab. 11).

Tab. 11 - Parametry článku LiFeYPO₄ [44]

Typ:	LFP200AHA-B (TALL)	Maximální nabíjecí napětí:	4,0 V
Kapacita:	200 Ah	Minimální napětí:	2,8 V
DOD	80 %	Hmotnost:	7,7 kg
Napětí článků:	3,2 V	Rozměry (v,š,d):	183x100x276mm
Počet cyklů:	5000 při DOD80%	Cena s DPH:	11 680 Kč

Akumulační kapacita:

$$C_s = \frac{E_k}{U_b * DOD_{pb}} = \frac{169490 * 100}{48 * 80} = 4413,8 \text{ Ah} \quad 3.10$$

Kde: C_s kapacita baterie pro slunečný den (Ah),
 E_k přebyteková energie (Wh),
 U_b napětí baterie (V),
 DOD_{Li} hodnota vybití (%).

Počet paralelních větví baterie

$$n_p = \frac{C_s}{3 * C_{\xi}} = \frac{4413,8}{3 * 200} = 7,35 \sim 7 \quad 3.11$$

Kde: n_p počet článků paralelně (-),
 C_s celková akumulací kapacita (Ah),
 C_{ξ} kapacita jednoho článku (Ah).

Počet sériových článků ve větvi

$$n_s = \frac{U_b}{U_{\xi}} = \frac{48}{3,2} = 15 \quad 3.12$$

Kde: n_s počet článků sériově (-),
 U_b napětí bloku baterie (V),
 U_{ξ} napětí článků (V).

Celkový počet článků

$$n = 3 * n_s * n_p = 3 * 7 * 15 = 315 \quad 3.13$$

Kde: n celkový počet článků (-),
 n_s počet baterií sériově (-),
 n_p počet baterií paralelně (-).

Počet baterií je vyšší a od toho se odvíjí i vyšší cena. Výdrž těchto baterií je ovšem nejméně 4,5x vyšší než u olovených akumulátorů. U těchto akumulátorů je ovšem třeba dokoupit ještě další doplňky jako teplotní senzory a balancéry pro rovnoměrné nabíjení. Tyto články jsou velice náchylné na přebíjení a hluboké vybití. Naopak netrpí tak moc samovybíjením. Dále pak nižší váha celého celku. Olovený článek váží 28kg, oproti tomu lithiová baterie 7,7kg. Na celku to dělá rozdíl váhy cca o 4,5 tuny. Při umístění v podkroví tenhle fakt může výrazně ovlivnit volbu typu. Také velikost plochy pro bateriový systém se výrazně liší. Olovené baterie jsou rozměrnější i při nižším počtu a vyžadují větší plochu.

3.6 Průtoková redoxní baterie s měničem

Tato baterie s maximální účinností 85% má velkou výhodu pro naše použití. Jedná se o baterii s rozdílnou úložnou kapacitou a dodávaným výkonem. Elektrolyt je skladován ve dvou nádržích, které mohou být různé veliké, nezávisle na velikosti článků. Zde je ovšem nutné tyto články

dimenzovat tak, aby byly schopny nabít baterii z přebytku fotovoltaické elektrárny, ale za krátkou dobu (cca 5h špičky). Pro srovnání například se zaplavenou olověnou baterií, kde se v elektrolytu nachází i elektrody, a baterie velké kapacity má schopnost dodávat daleko vyšší výkon než je potřeba. Tím také dochází k daleko větší spotřebě materiálu pro desky elektrod. V neposlední řadě zde nedochází k samovybíjení při dlouhém uskladnění energie, což v našem případě nejspíše nenastane, snad jen při poruše a odstavení baterií. V úvahu by například přišel model IMERGY ESP30. Tato varianta je kompletně připravená pro instalaci a je sestavena na klíč. Parametry této baterie jsou v Tab. 12.

Tab. 12 – Parametry VRB akumulace IMERGY ESP30 [45]

Parametry		
Výstupní parametry	380 až 480 V 50/60 Hz	15-45 kW [50kVA (PF=0.8)]
Čas přejezdu z nabíjení do spotřeby	-100 % to 100 % Výstup	<70ms
Rozměry	v x š x h	6 x 2.4 x 2.6 m
Počet cyklů		100,000
Účinnost akumulace		70-75%
Rozsah kapacity (DOD)		0 to 100%
Teplota prostředí		-20°C to +55°C
Nadmořská výška		do 2000 m
Relativní vlhkost		0-95%
Samovybíjení	% na den	0.010%
Váha		12,925 kg

Kapacita baterie by byla volena podle přebytku, tedy nějakých 150 kWh a články o výkonu 30 kW. Vzhledem k maximální spotřebě objektu je tato hodnota lehce předimenzovaná pro případ nutnosti. Je ovšem nutné na to pohlížet i v rámci nabíjení, kdy nabíjecí výkon je lehce vyšší než maximální spotřeba. Vstupní hodnoty pro ověření se nacházejí v Tab. 13.

Tab. 13 - Hodnoty určení instalovaného výkonu článků

Maximální naměřený výrobní výkon P_v	Minimální spotřeba v době špičky výroby P_s	Maximální naměřený odběr objektu P_{SM}
32 kW	6 kW	24 kW

$$P_{ins} = P_v - P_s = 32 - 6 = 26 \text{ kW} \quad 3.14$$

$$P_{ins} > P_{SM} = 26 > 24 \quad 3.15$$

Kde: P_{ins} instalovaný výkon článků (kW),
 P_v výrobní výkon elektrárny (kW) ,
 P_s spotřeba objektu v době výroby (kW),
 P_{SM} maximální spotřeba objektu (kW).

Jestliže podmínka splňuje požadavek, že vypočtený instalovaný výkon má vyšší hodnotu než maximální spotřeba objektu, je instalovaný výkon dostatečný. Pro návrh systému dodavatelem se zde zvolí vyšší hodnota výkonu podle toho, jak to umožňují výkony jednotlivých článků. Dále je možno přičíst výkonovou rezervu.

4. Porovnání navržených variant dle technických a ekonomických kritérií

4.1 Srovnání kritérií

Poslední částí mé práce je zhodnocení navržených variant dle technických a ekonomických kritérií. Vezmu tedy v úvahu účinnosti jednotlivých systémů a pro stejnou hodnotu uložené energie získaný výkon z akumulace. Tato hodnota bude důležitá pro výpočet návratnosti systému. Pokud návratnost systému bude delší než doba životnosti akumulace (životnost baterií, měniče, atd.), je velice pravděpodobné, že investor od této varianty upustí.

Jedinou relativně neznámou v tomto návrhu je růst ceny elektřiny za dané období životnosti elektrárny, což je závislé na mnoha faktorech. Ať už na dodavateli elektřiny, úsporách elektřiny, které paradoxně můžou cenu silové elektřiny časem zvýšit, i když momentálně klesá, nebo možnému zvýšení poplatku za přípojku. Poplatek za přípojku ovšem nemusím řešit, neboť bude placen za všech okolností. Pouze u ostrovního provozu by bylo možno zrušit přípojku.

4.2 Srovnání technických kritérií

Nejprve srovnám účinnosti a koncový získaný výkon pro jeden slunečný den. Poměr slunečných dnů v letním období uvažuji přibližně pět ke dvou, podle měsíčního grafu výroby (Obr. 20). Na pět slunečných dnů připadají dva polojasné nebo zatažené. Pro tyto dny budu brát nejnižší hodnotu výroby, abych došel co nejpřesnějšího srovnání v další části porovnání celkové energie za letní období. Přesnější výpočty nemají smysl. Počasí je nevyzpytatelné a já nejsem schopen předem určit, kolik slunečných dnů bude následující léto mít. Účinnosti olověné baterie a lithiové baterie v datasheetu uvedeny nejsou. V úvahu tedy vezmu střední hodnotu účinnosti z tabulky srovnání (Tab. 4). Pro přesnou hodnotu by tedy bylo nutno kontaktovat buď výrobce, nebo zakoupit jeden článek pro měření.

Tab. 14 - Tabulka účinností pro srovnání

	Měnič η_m	Pb akumulátor η_{Pb}	LiFeYPO ₄ baterie η_{Li}	VR baterie + měnič η_{VR}
Účinnost (%)	91	80	87,5	70 - 75
Počet cyklů (-)	-	1200	5000	až 100 000
Hmotnost (t)	-	7,4	2,4	13

Jak je vidět v tabulce (Tab. 14), bude účinnější LiFeYPO₄ baterie. Tato hodnota se ovšem týká pouze baterie bez měniče, což nelze srovnávat s kompletním celkem VR baterie. Hmotnost je vypočítaná rovnou pro daný počet článků baterie podle výpočtu 4.1. Hodnoty jsou převzaty z tabulek jednotlivých parametrů baterií (Tab. 10 a Tab. 11) a výpočtů počtu kusů článků (3.9 a 3.13). Hmotnost vanadiové redoxní baterie je převzata z tabulky parametrů (Tab. 12). Tento parametr rozhoduje o umístění baterie vzhledem k nosnostem podlahy, došlo-li by k umístění baterií v podkroví objektu.

Váha olověné baterie:

$$m_{Pb} = n_{Pb} * m_{\zeta Pb} = 264 * 28 = 7392 \text{ kg} \quad 4.1$$

Kde: m_{Pb} váha celkové olověné baterie (kg),
 n_{Pb} celkový počet článků olověné baterie (-),
 $m_{\zeta Pb}$ váha jednoho článku (kg).

Váha LiFeYPO₄ baterie:

$$m_{Li} = n_{Li} * m_{\zeta Li} = 315 * 7,7 = 2425 \text{ kg} \quad 4.2$$

Kde: m_{Li} váha celkové olověné baterie (kg),
 n_{Li} celkový počet článků olověné baterie (-),
 $m_{\zeta Li}$ váha jednoho článku (kg).

Předpokládaná účinnost měniče s olověnými bateriemi:

$$\eta_{Pb+m} = \eta_{Pb} * \eta_m = \frac{80}{100} * 91 = 72,8\% \quad 4.3$$

Kde: η_{Pb+m} účinnost celku (%),
 η_{Pb} účinnost olověné baterie (%),
 η_m účinnost měniče (%).

Předpokládaná účinnost měniče s LiFeYPO₄ bateriemi:

$$\eta_{Li+m} = \eta_{Li} * \eta_m = \frac{87,5}{100} * 91 = 79,6\% \quad 4.4$$

Kde: η_{Li+m} účinnost celku (%),
 η_{Li} účinnost olověné baterie (%),
 η_m účinnost měniče (%).

Účinnosti celku, jak byly spočteny výše (4.3 a 4.4), se vztahují na energii uloženou a později použitou. Ve dne tedy dochází během přebytku k daleko vyšší účinnosti využití energie z FVE. Proto musím vyřešit energii odebranou v noci z akumulace a ve dne v době přebytku energii přímo z fotovoltaické elektrárny. Čas doby přebytku energie se přibližně pohybuje ve slunečný den od 7 do 18 hodin. Tato doba byla vyčtena z grafu výše (Obr. 18). Čas je určen od doby, kdy výroba převyší spotřebu (cca 7 kW). V tuto dobu není třeba započítávat účinnost bateriového systému. Spotřeba

objektu se pohybuje okolo 80 kWh v denním přebytku výroby mezi 7 a 18 hodinou (Obr. 22). Hodnota byla vypočítána z naměřených údajů. V zatažený den, kdy dochází k chvilkovému nabíjení a poté zase vybíjení, účinnost klesne na hodnotu bateriového provozu. Všechny potřebné hodnoty jsou zapsány v Tab. 15.

Tab. 15 - Hodnoty pro výpočet energetické bilance

	Výroba:		Doba přebytku výroby:	12 h
Slunečno:	259,88 kWh		Průměrný odběr objektu v době přebytku:	7 kW
Zataženo:	103,13 kWh		Počet slunečných/zatažených dnů za týden:	5/2

Využitá energie za slunečný den s Pb akumulátorem:

$$E_{OSpb} = t * P_p * \frac{\eta_m}{100} + \left(E_{VS} - \left(t * P_p * \frac{\eta_m}{100} \right) \right) * \frac{\eta_{Pb+m}}{100} \quad 4.5$$

$$E_{OSpb} = 12 * 7 * \frac{91}{100} + \left(259,88 - \left(12 * 7 * \frac{91}{100} \right) \right) * \frac{72,8}{100} = 214 \text{ kWh}$$

Kde: E_{OSpb} energie z akumulačního systému za slunečný den (kWh),
 t doba přebytku (h),
 P_p průměrný odběr v době přebytku (kW),
 η_m účinnost měniče (%),
 E_{VS} vyrobená energie za slunečný den (kWh),
 η_{Pb+m} účinnost baterie a měniče (%).

Využitá energie za zatažený den s Pb akumulátorem:

$$E_{OZpb} = E_{VZ} * \frac{\eta_{Pb+m}}{100} = 103,13 * \frac{72,8}{100} = 75 \text{ kWh} \quad 4.6$$

Kde: E_{OZpb} energie z akumulačního systému za slunečný den (kWh),
 E_{VZ} vyrobená energie za zatažený den (kWh),
 η_{Pb+m} účinnost baterie a měniče (%).

Využitá energie za dvouměsíční období s Pb akumulátorem:

$$E_{OPb} = (n_{DS} * E_{OSpb} + n_{DZ} * E_{OZpb}) * \frac{n_{dm}}{7} \quad 4.7$$

$$E_{OPb} = (5 * 214 + 2 * 75) * \frac{62}{7} = 10\,806 \text{ kWh}$$

Kde: E_{OPb} energie z akumulačního systému dva letní měsíce (kWh),
 n_{DS} počet slunečných dnů v týdnu (-),
 E_{OSpb} energie z akumulačního systému za slunečný den (kWh),
 n_{DZ} počet zatažených dnů v týdnu (-),
 E_{OZpb} energie z akumulačního systému za zatažený den (kWh),
 n_{dm} počet dnů v období (-).

Využitá energie za slunečný den s LiFeYPO₄ akumulátorem:

$$E_{OSLi} = t * P_P * \frac{\eta_m}{100} + \left(E_{VS} - \left(t * P_P * \frac{\eta_m}{100} \right) \right) * \frac{\eta_{Li+m}}{100} \quad 4.8$$

$$E_{OSLi} = 12 * 7 * \frac{91}{100} + \left(259,88 - \left(12 * 7 * \frac{91}{100} \right) \right) * \frac{79,6}{100} = 222,5 \text{ kWh}$$

Kde: E_{OSLi} energie z akumulačního systému za slunečný den (kWh),
 t doba přebytku (h),
 P_P průměrný odběr v době přebytku (kW),
 η_m účinnost měniče (%),
 E_{VS} vyrobená energie za slunečný den (kWh),
 η_{Li+m} účinnost baterie a měniče (%).

Využitá energie za zatažený den s LiFeYPO₄ akumulátorem:

$$E_{OZLi} = E_{VZ} * \frac{\eta_{Li+m}}{100} = 103,13 * \frac{79,6}{100} = 82 \text{ kWh} \quad 4.9$$

Kde: E_{OZLi} energie z akumulačního systému za slunečný den (kWh),
 E_{VZ} vyrobená energie za zatažený den (kWh),
 η_{Li+m} účinnost baterie a měniče (%).

Využitá energie za dvouměsíční období s LiFeYPO₄ akumulátorem:

$$E_{OLi} = (n_{DS} * E_{OSLi} + n_{DZ} * E_{OZLi}) * \frac{n_{dm}}{7} \quad 4.10$$

$$E_{OLi} = (5 * 222,5 + 2 * 82) * \frac{62}{7} = 11\,306 \text{ kWh}$$

Kde: E_{OLi} energie z akumulačního systému dva letní měsíce (kWh),
 n_{DS} počet slunečných dnů v týdnu (-),
 E_{OSLi} energie z akumulačního systému za slunečný den (kWh),
 n_{DZ} počet zatažených dnů v týdnu (-),
 E_{OZLi} energie z akumulačního systému za zatažený den (kWh),
 n_{dm} počet dnů v období (-),

Pro výpočet účinnosti akumulace pomocí vanadové redoxní baterie budu předpokládat stejnou účinnost měniče při přímém provozu. V katalogovém listu je uvedena pouze účinnost akumulačního prvku spolu s měničem. Pro objektivitu porovnání a maximální možnou využitou energii z tohoto systému je to tedy nutnost.

Využitá energie za slunečný den s VR akumulátorem:

$$E_{OSVR} = t * P_P * \frac{\eta_m}{100} + \left(E_{VS} - \left(t * P_P * \frac{\eta_m}{100} \right) \right) * \frac{\eta_{VR+m}}{100} \quad 4.11$$

$$E_{OSVR} = 12 * 7 * \frac{91}{100} + \left(259,88 - \left(12 * 7 * \frac{91}{100} \right) \right) * \frac{75}{100} = 214 \text{ kWh}$$

Kde: E_{OSVR} energie z akumulačního systému za slunečný den (kWh),
 t doba přebytku (h),
 P_P průměrný odběr v době přebytku (kW),
 η_m účinnost měniče (%),
 E_{VS} vyrobená energie za slunečný den (kWh),
 η_{VR+m} účinnost baterie a měniče (%).

Využitá energie za zatažený den s VR akumulátorem:

$$E_{OZVR} = E_{VZ} * \frac{\eta_{VR+m}}{100} = 103,13 * \frac{75}{100} = 77 \text{ kWh} \quad 4.12$$

Kde: E_{OZVR} energie z akumulačního systému za slunečný den (kWh),
 E_{VZ} vyrobená energie za zatažený den (kWh),
 η_{VR+m} účinnost baterie a měniče (%).

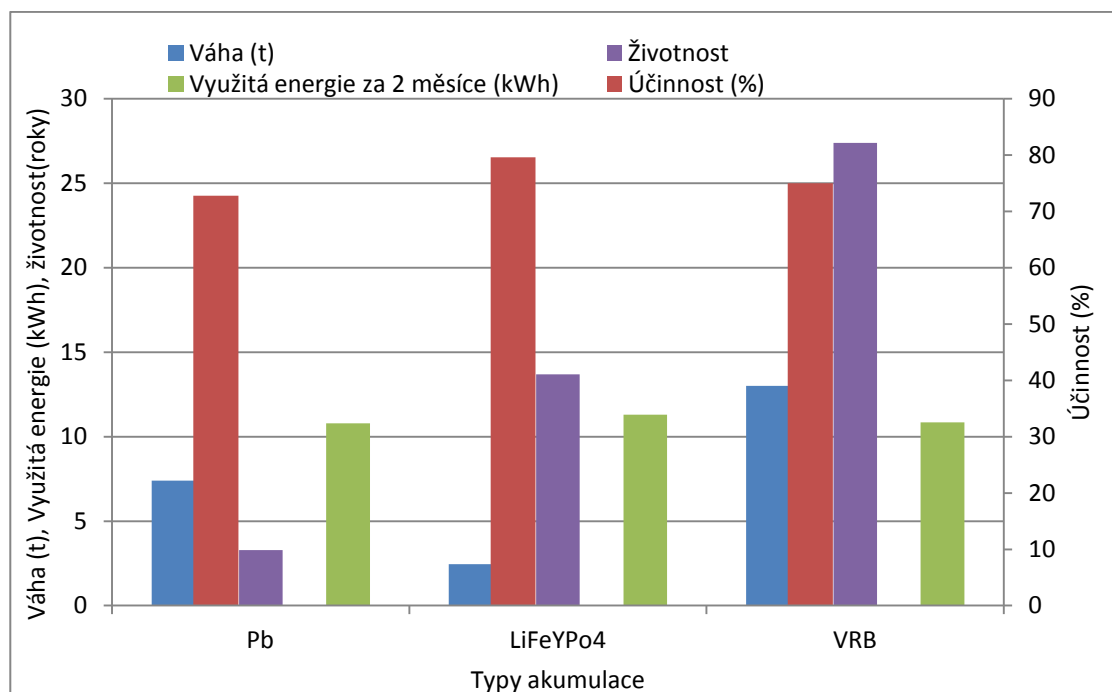
Využitá energie za dvouměsíční období s VR akumulátorem:

$$E_{OVR} = (n_{DS} * E_{OSVR} + n_{DZ} * E_{OZVR}) * \frac{n_{dm}}{7} \quad 4.13$$

$$E_{OVR} = (5 * 214 + 2 * 77) * \frac{62}{7} = 10\,848 \text{ kWh}$$

Kde: E_{OVR} energie z akumulačního systému dva letní měsíce (kWh),
 n_{DS} počet slunečných dnů v týdnu (-),
 E_{OSVR} energie z akumulačního systému za slunečný den (kWh),
 n_{DZ} počet zatažených dnů v týdnu (-),
 E_{OZVR} energie z akumulačního systému za zatažený den (kWh),
 n_{dm} počet dnů v období (-),

Nejúčinnějším systémem tedy podle hodnoty účinností bude systém s lithiovou baterií. Energie, kterou přes letní měsíce zužitkuje objekt, se pohybuje okolo 11,3 MWh. S olověnou a vanadovou baterií se energie pohybuje okolo 10,8 MWh. Za letní měsíce se tedy ušetří cca 0,5 MWh. Rozdíl není tedy tak znatelný, jak by se podle účinností zdálo, což je i patrné z grafu (Obr. 28). Další možností, kterou jsem zde již zmiňoval, je přesunout část noční spotřeby (mezi 23 až 3 hodinou ránní) nejspíše pro ohřev TUV na denní čas a přebytek ukládat do baterií. Výhodné je, že počet instalovaných baterií bude poloviční, což se výrazně projeví na ceně.



Obr. 28 - Srovnání technických parametrů akumulčních systémů

Druhou stránkou věci je ovšem stárnutí baterií a jejich slábnoucí kapacita. Zde se olověné baterie řadí velice nízko pouze s 1200 cykly. O dost líp jsou na tom lithiové baterie s 5000 cykly. Tyto cykly jsou počítány při 80% vybití, k čemuž byla i navrhnutá baterie. Stinnou stránkou baterie v reálném provozu je háklivost na cykly v době poloslunečného dne, kdy je chvíli baterie nabíjena velkým proudem a v zápětí zase vybíjena při nedostatečné výrobě. Nejlepší variantou se stává tedy vanadová redoxní baterie. Výrobce udává až 100 000 cyklů i při 100% vybití. Vzhledem k tabulce srovnání (Tab. 4), kde je uvedeno 10 000 cyklů, je pravděpodobnější životnost.

Co se týká váhy akumulčního zařízení, vítězí lithiové baterie. Také co se týká velikosti prostoru, lithiové baterie jednoznačně vítězí. Je zde vyšší kapacita na kilogram než u olověných akumulátorů. U vanadové redoxní baterie je sice ještě vyšší, ale je třeba brát v úvahu velikost nádrží s elektrolytem. Pro instalaci do objektu by bylo nutno nejspíše velkých stavebních úprav.

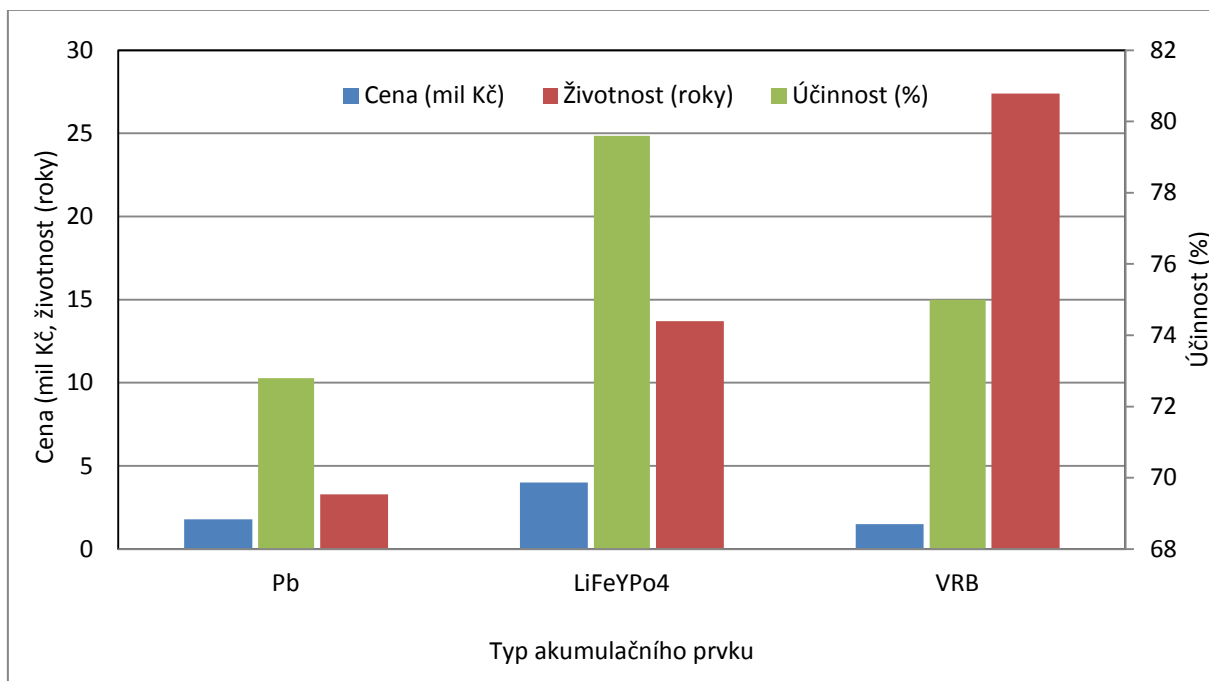
Údržba lithiových akumulátorů je prakticky nulová v době životnosti. Pro dlouhou životnost je ale třeba každé baterii přidat balanční zařízení, aby v době nabíjení a rozdílne kapacity, ač malé, nedocházelo k přebíjení slabšího článku a tím dalšímu poškození článků. Dále alespoň umístit na několika člancích teplotní snímače pro předejití nehodám a možnému požáru. Mnou zvolená trakční olověná baterie slibuje vyšší počet cyklů než jiné bezúdržbové akumulátory. Nevýhodou je dolévání destilované vody do článků, která se časem odpaří nebo se rozloží na plyny. A to přibližně co tři měsíce. Čas od času je taky dobré provádět desulfataci baterií. Další nutností takového bateriového systému je ventilační systém a odvod par a emisí plynů z článků. U obou bateriových systémů dále by měla být součástí klimatizace místnosti z důvodu snížení teploty a tím i tepelné degradaci baterií. Vanadová redoxní baterie je také bezúdržbová. Zde žádný speciální nárok není. Dodavatel dodává hotový systém se vším potřebným na zakázku. Při poruše dojde s největší pravděpodobností k poruše membrán článku, nebo čerpadel, což vyžaduje servisní zásah. Chlazení ani v tomto případě nebude na škodu.

4.3 Srovnání finančních kritérií

Zde se zaměřím na pořizovací cenu bez práce a dalších stavebních úprav a úprav elektroinstalace. Později také na návratnost ceny zařízení, což je pro investora zásadní informace, podle které buďto daný projekt v budoucnu schválí, nebo zamítne. Cena průtokové baterie je neznámá. Na stránkách výrobce není uvedena ani cena za kWh. Proto převzmu cenu na kW z tabulky srovnání výše (Tab. 4). Toto je ovšem jen přibližná cena, která se od reálné může velice lišit. Pro budoucí úmysly je třeba toto řešit přímo s výrobcem. Pro srovnání vezmu v úvahu aktuální cenu za silovou elektřinu 3,71 Kč.

Tab. 16 - Cena jednotlivých prvků akumulace

	Měnič Infinisolar	Olověná baterie	Lithiová baterie	Průtoková baterie s měničem
Cena zařízení (Kč)	104 900,-	5 556,-	11 680,-	35 000/kW
Počet kusů:	3	264	315	30 kW instalováno
Celková cena	314 700,-	1 467 840,-	3 679 200,-	1 500 000,-
Životnost	-	cca 3 roky	cca 10 let	27 let (10 000 cyklů)
Finanční úspora za život	-	360 000,-	1 258 350,-	3 259 926,-
Cena za 27 let provozu	-	13 210 560,-	9 933 840,-	1 500 000,-



Obr. 29 - Srovnání ekonomických parametrů akumulčních systémů

V tabulce výše (Tab. 16) je patrné, jak drahé toto zařízení je. Celkové srovnání různých systémů je viditelné v grafu (Obr. 29). Nejlevnější variantou je využití olověných akumulátorů. Bohužel doba výdrže je cca 3 roky. Za tuto dobu se nám tato investice určitě nezaplatí. Při měsíční úspoře okolo 20 tisíc korun a provozu 6 měsíců v roce činí úspora zhruba 120 tisíc korun. Investiční náklady jen za baterie a měnič jsou téměř 2 milióny korun. V této ceně nejsou započteny doprovodné stavební práce, kabeláž, balancéry pro lithiové baterie a další doprovodný materiál. Pokud by konečná cena akumulčního systému s olověnou trakční baterií byla okolo 3 miliónů korun a z toho by dotace Evropské unie činily 50% nákladů, tento systém s životností tří let by se zaplatil za 12,5 roku. Podobě na tom bude systém s lithiovou baterií. Jistou naději poskytuje poslední varianta s průtokovou baterií. Výrobce slibuje až 100 000 cyklů. Cena je také přijatelná. Tato cena ale bohužel jen přibližně naznačuje cenu akumulace.

Jelikož je tato technologie zatím nová, tyto ceny se budou pohybovat vysoko. Naději pro význam investice je jedině energetická krize a drastické zvýšení cen silové energie. Tato investice je tedy spíše výstřel do prázdna vzhledem k postupným klesajícím cenám silové energie.

Další alternativou pro tento akumulční systém je razantní snížení nočního odběru nebo jeho převedení na denní odběr ve špičce výroby energie. Akumulační prvek je nejdražší částí. Snížením jeho kapacity o polovinu se dostáváme na hranici ceny návratnosti systému u lithiových baterií a vanadové redoxní baterie.

Závěr

Cílem této práce bylo zaměřit se na alternativní zdroje energie a možnou akumulaci energie z těchto zdrojů pro ostrovní provoz. První částí tedy bylo nutno rozebrat všechny alternativní zdroje s nestabilní dodávkou energie. Ačkoliv se o vodní elektrárně dá polemizovat, myšlenka této elektrárny je taková, že nemá dostatečný výkon pro pokrytí chvilkové špičky odběru elektrické energie.

Ve druhé části jsem se zabýval různými druhy akumulačních systémů na různých bázích. Jsou zde rozebírány jejich výhody a nevýhody, životnost nebo ekologická stránka zvláště chemických akumulátorů. Srovnání, které se nachází na konci této kapitoly, jasně poukazuje na vhodnost použití jednotlivých akumulačních prvků v různých aplikacích. Je například jasné, že stavět přečerpávací elektrárnu pro malou úložnou kapacitu a malý výkon nemá smysl, stejně tak i využívat bateriový systém pro akumulaci přebytku například z jaderné elektrárny nebo velkých polí větrných elektráren nebo fotovoltaických elektráren.

V kapitole 3. je návrh možného řešení akumulačního systému pro jeden nejmenovaný objekt s již instalovanou fotovoltaickou elektrárnou. Ostrovní Offgrid provoz tohoto objektu bohužel nepřicházel v úvahu, proto byl zvolen alespoň provoz hybridní. Dále bylo třeba vyřešit akumulátory, jejich kapacitu a zapojení. Předcházelo tomu ovšem zvolení nutného měniče s implementovaným MPPT nabíjecím prvkem. Tento měnič udával parametry baterie, tedy její napětí a maximální nabíjecí proudy a hlavně rozdělení na počet bateriových bloků.

Poslední částí bylo vyhodnocení technické a finanční stránky věci. V technické oblasti si všechny systémy vedly, alespoň co se týče účinností, přibližně stejně. Účinnost se pohybovala mezi 72 až 80%. Rozdíly nastaly ve velikosti zařízení a váze. Pokud pohlédneme na finanční stránku věci, může to být velkým zklamáním. Podle vypočtených hodnot a stávající ceně silové energie, bez uvážení nočních tarifů se sníženou cenou, je bohužel jasné, že se systém za dobu životnosti nezaplatí. Nejhuře dopadl systém s olověnou baterií. O něco lépe se umístil systém s lithiovou baterií, ale nejlépe se umístil systém s průtokovou baterií. Bohužel zde zase není jasně udaná cena zařízení, a tudíž to může být zavádějící. Stejně je to se srovnáním životností baterií. Úplným zklamáním je olověná trakční baterie. O něco líp na tom je lithiová baterie s 5000 cykly. Uvedený počet cyklů průtokové baterie, dosahující hodnoty 100 000 což je 270 let provozu. Toto je možná životnost elektrolytu, ovšem dříve přijdou poruchy membrány, čerpadel, měniče a nabíjení. Jiné zdroje uvádí 13 000 cyklu a více. Reálnou životnost tedy nelze určit. Prvotní poruchou bude nejspíše protržení membrány článku. I tak je ale tato baterie potencionálním vítězem srovnání.

Dle mého názoru se v průtokových bateriích nachází velký potenciál pro budoucí použití. Bude třeba ovšem ještě pár let nechat tyto systémy ve vývoji až budou plně komerčně k dispozici. Díky jejich konstrukci by se mohly stát i budoucí energetickou jednotkou elektromobilu, kdy místo dlouhého dobíjení lithiové baterie pomocí tankovací pistole vyměníme obsah dvou nádrží s elektrolytem.

Literatura

- [1] Cenek, M.: Akumulátory od principu k praxi, FCC Public.
- [2] Barin, A. and col.: Multiple Criteria Analysis for Energy Storage Selection, Journal of Energy and Power Engineering, 2011.
- [3] Bartoš, V.: Obnovitelné zdroje energií, Grada Publishing, Praha, 2010.
- [4] Bilíček, P.: Problematika větrných a fotovoltaických zdrojů v distribučních sítích, Diplomová práce, Ostrava, 2011.
- [5] Libra, M., Poulek, V.: Fotovoltaika – Teorie i praxe využití solární energie, Vydavatelství ILSA, 2009.
- [6] Murtinger, K., Beranovský, J., Tomeš, M.: Fotovoltaika - elektřina ze slunce, Vydavatelství ERA, 2007.
- [7] Nieslanik, T.: Analýza kvality napětí z obnovitelných zdrojů, Bakalářská práce, Ostrava, 2010.
- [8] Malyrz, L.: Současné možnosti akumulace energie, Bakalářská práce, Ostrava, 2012.
- [9] SÝKORA, Tomáš. Problematika připojování větrných elektráren do distribuční sítě Zdroj: <http://www.tzb-info.cz/4279-problematika-pripojovani-vetnych-elektraren-do-distribucni-site>. Tzb info: stavebnictví, úspory energií, technická zařízení budov [online]. Praha 6: Topinfo, ©2001-2016 [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/4279-problematika-pripojovani-vetnych-elektraren-do-distribucni-site>
- [10] DVOŘÁK, Petr, Petr BAČA a David PLÉHA. Akumulace elektřiny. Tzb info [online]. Praha 6: topinfo, ©2001-2016 [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/7435-akumulace-elektriny>
- [11] Akumulace elektrické energie. 4-CONSTRUCTION: Stavení informace, práce, inzerce [online]. Bratislava: 4-INDUSTRY, 2007 [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: <http://www.4-construction.com/cz/clanek/akumulace-elektricke-energie/>
- [12] Energy Storage Technologies. ESA: Energy storage Association [online]. Washington, DC: Energy Storage Association, 2016 [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: <http://www.electricitystorage.org/site/technologies/>
- [13] ŠTĚRBA, Mojmír. Regulace, akumulace - neuralgický bod elektrizační soustavy. PRO ATOM WEB [online]. (c)2007-2008 [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: <http://proatom.luksoft.cz/view.php?cislocclanku=2008050001>
- [14] ELEKTROPROUD s.r.o. [online]. Plzeň: DESTINY, 2009 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <http://www.ekoproud.cz/clanky.php>
- [15] Jaké fotovoltaické panely použít: 5.díl ze seriálu článků. Deramax.cz: Český výrobce elektrotechniky [online]. Valašské Meziříčí: Deramax [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: <http://www.deramax.cz/5-jake-fotovoltaicke-panely-pouzit-5-dil-ze-serialu-clanku>

-
- [16] Šúri M., Huld T.A., Dunlop E.D. Ossenbrink H.A., 2007. Potential of solar electricity generation in the European Union member states and candidate countries. *Solar Energy*, 81, 1295–1305, <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>.
- [17] Huld T., Müller R., Gambardella A., 2012. A new solar radiation database for estimating PV performance in Europe and Africa. *Solar Energy*, 86, 1803-1815.
- [18] MOLDŘÍK, Petr, Daniel MINAŘÍK, Jan VACULÍK a Zdeněk HRADÍLEK. Vliv akumulace elektrické energie na provoz fotovoltaické elektrárny. *Elektrorevue* [online]. 2013, 15(6), 386-390 [cit. 2016-04-25]. ISSN 1213-1539. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/cz/clanky/energetika--vykonova-elektronika--elektrotechnologie/10/vliv-akumulace-elektricke-energie-na-provoz-fotovoltaicke-elektrarny--effects-of-the-accumulation-of-electricity-on-the-operation-of-photovoltaic-power-plants-/>
- [19] ŠKORPÍK, Jiří. Území vhodná pro umístění větrných elektráren: rozbor závažností střetů s ochranou přírody. *Transformační technologie* [online]. Brno, 2011 [cit. 2016-04-25]. ISSN 1804-8293. Dostupné z: <http://www.transformacni-technologie.cz/obrazky/218.jpg>
- [20] Fungování větrných elektráren. Skupina ČEZ [online]. Praha 4: ČEZ, 2016 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/obnovitelne-zdroje/vitr/flash-model-jak-funguje-vetrna-elektrarna.html>
- [21] Velikost větrné elektrárny a její vývoj. ČSVE [online]. Praha 1: Česká společnost pro větrnou energii, 2013 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <http://www.csve.cz/clanky/velikost-vetrne-elektrarny-a-jeji-vyvoj/110>
- [22] KOČ, Břetislav. Z historie větrných elektráren. FCC PUBLIC. ELEKTRO: Časopis pro elektrotechniku [online]. 2005, (12) [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/z-historie-vetrnych-elektraren--13364>
- [23] Vetrné elektrárny v ČR: Mapy. ČSVE: Česká společnost pro větrnou energii [online]. Brno: Česká společnost pro větrnou energii, 2013 [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: <http://www.csve.cz/aktualni-instalace>
- [24] Litoměřice: Geotermální energie [online]. Litoměřice: Geotermální energie, 2013 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <http://prvnigeotermalni.cz/cz/otazky-a-odpovedi/jaky-je-hlavni-cil-projektu-a-jak-pomuze-lidem-v-litomericich>
- [25] MĚSTSKÝ ÚŘAD SEMILY. Geotermální elektrárna: Schéma geotermální elektrárny v Semilech. Krajské LISTY [online]. Praha 5: Krajské listy, ©2013-2016 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <http://www.krajskelisty.cz/liberecky-kraj/okres-semily/608-jde-v-semilech-o-pokrok-nebo-o-ohrozeni.htm>
-

-
- [26] Vodní stroje a zařízení. LITOSTROJPOWER: ČKD Blansko Engineering [online]. Blansko: ČKD Blansko Engineering, 2009 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <http://www.cbeng.cz/vodni-stroje-a-zarizeni/>
- [27] Přecherčpávací vodní elektrárna Dlouhé stráně. Skupina ČEZ [online]. Praha 4: ČEZ, 2016 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/cs/vyroba-elekrtriny/obnovitelne-zdroje/voda/dlouhe-strane.html>
- [28] Typy turbín. STUDENÍK, Jiří a Michal SVITAVSKÝ. STŘEDNÍ PRŮMYSLOVÁ ŠKOLA ELEKTROTECHNICKÁ A INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ BRNO. Energie větru, vody, biomasy. Brno, 2015. ISBN 978-80-88058-08-3. Dostupné také z: <https://publi.cz/books/90/12.html>
- [29] ELSNER, Petr. Akumulace energie z obnovitelných zdrojů. Nová Paka, 2015. Dostupné také z: http://www1.fs.cvut.cz/stretech/2015/sbornik_2015/0750.pdf
- [30] TOŠER, Pavel, Sebastian VACULÍK a Petr BAČA. Náklady na akumulaci elektřiny v sekundárních člancích. Tzb info [online]. Topinfo, 2013 [cit. 2016-04-26]. ISSN 1801-4399. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/10362-naklady-na-akumulaci-elekrtriny-v-sekundarnich-clancich>
- [31] Jaké akumulátory použít: 7.díl ze seriálu článků. Deramax.cz: Český výrobce elektrotechniky [online]. Valašské Meziříčí: Deramax [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: <http://www.deramax.cz/7-jake-akumulatory-pouzit-7-dil-ze-serialu-clanku>
- [32] Radíme vám: Dotazy. EXIDE SLOVAKIA. Exide: Batteries [online]. Praha 10: Micarp, 2011 [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: <http://www.exide-cz.cz/cz/radime-otazky/>
- [33] Používání Li-Ion akumulátorů v praxi. Abeceda baterií a akumulátorů [online]. Slaný: BATTEX, 2016 [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: <http://www.battex.info/hermeticke-akumulatory/li-akumulatory/pouzivani-li-ion-akumulatoru-v-praxi>
- [34] PAVLIS, Jakub. Li-Pol akumulátory - proč se nejpokročilejší technologie neprosazuje? In: NOTEBOOK.cz [online]. Praha 10: Viktor Péder, 2016 [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: <http://notebook.cz/clanky/technologie/2011/Li-Pol-akumulatory>
- [35] Compressed Air Energy Storage (CAES). ESA: Energy Storage Association [online]. Washington, DC: Energy Storage Association, 2016 [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: <http://energystorage.org/compressed-air-energy-storage-caes>
- [36] AA-CAES TECHNOLOGY. Alacaes: An airlight energy company [online]. Biasca: ALACAES, 2015 [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: <http://www.alacaes.com/aa-caes-technology/>
- [37] Wind/CAES. In: WindSoHy [online]. Overland park, KS: WindSoHy, LLC, 2013 [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: http://windsohy.com/index.php?option=com_content&task=view&id=42&Itemid=34
- [38] How does a Supercapacitor Work? Battery University [online]. Richmond: Cadex
-

Electronics, ©2003-2016 [cit. 2016-04-26]. Dostupné z:
http://batteryuniversity.com/learn/article/whats_the_role_of_the_supercapacitor

- [39] Hradílek, Z.; Chválek, R.: *Výzkum akumulace energie z obnovitelných zdrojů v palivových článcích*. VŠB-TU Ostrava, EPE 2009
- [40] JANÍK, Luděk a Petr DLOUHÝ. Technet: Jak se vyrábí palivo budoucnosti. Vodík pro auta i elektroniku. Technet.cz [online]. Praha 5: MAFRA, 2016 [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: http://technet.idnes.cz/jak-se-vyrabi-palivo-budoucnosti-vodik-pro-auta-i-elektroniku-p6d-tec_tecnika.aspx?c=A080127_234744_tec_tecnika_vse
- [41] kltpc: Ostrovní fotovoltaický systém 1440Wp [online]. [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: <http://okltpc.mypage.cz/menu/ostrovní-fotovoltaický-systém>
- [42] Nazeleno.cz: Chytrá řešení pro každého [online]. 2015 [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: http://www.nazeleno.cz/Files/FckGallery/obr3_434.jpg
- [43] TermoWatt [online]. Česká Lípa: TermoWatt s.r.o. [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: http://www.termowatt.cz/fotovoltaicke-elektrarny/img/Př%C3%ADmý%20výkup_schéma.jpg
- [44] Ostrovní off-grid fotovoltaické elektrárny a systémy, FV panely, regulátory MPPT, baterie, měniče. Ing. Martin Kolařík: Ostrovní fotovoltaické elektrárny [online]. Přerov: TRELL [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: <http://www.ostrovní-elektrarny.cz/>
- [45] IMERGY POWER SYSTEM. IMERGY ESP30™ SERIES: 15-45 kW, 120-200 kWh. Fremont, CA: Imergy Power Systems, Inc, 2015. Dostupné také z: http://assets.imergy.com/uploads/products/718/data-sheet/Imergy-ESP30_12000001004-005_082115.pdf